

Analiza użytkowania mieszaniny biogazu i gazu LNG lub gazu ziemnego w urządzeniach przystosowanych do spalania gazu grupy S

Analysis of the use of a mixture of biogas and LNG gas or natural gas in devices adapted to burn gas of S group

Robert Wojtowicz

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: W artykule zaprezentowano wyniki badań, których celem była ocena możliwości użytkowania mieszaniny wstępnie oczyszczonego biogazu rolniczego i gazu LNG lub gazu ziemnego wysokometanowego grupy E w urządzeniach przystosowanych do spalania gazu ziemnego grupy S. Badaniom poddano urządzenia wykorzystywane do przygotowywania posiłków oraz do wytwarzania ciepłej wody na cele sanitarne i grzewcze. Przedstawiono krótką charakterystykę wytypowanych do badań urządzeń gazowych. Badane urządzenia posiadały palniki oraz automatykę gazową przystosowaną do spalania gazu ziemnego grupy S. Do badań zostały wytypowane kuchnia i płyta gazowa (wyposażone w dwa różne typy palników) oraz dwa kotły gazowe. Jeden z kotłów wyposażony był w palnik typu pre-mix i miał zamkniętą komorę spalania, natomiast drugi kocioł posiadał palnik kinetyczno-dyfuzyjny i otwartą komorę spalania. Badane urządzenia stanowiły odzwierciedlenie najpopularniejszych konstrukcji urządzeń gazowych użytku domowego w swojej grupie wykorzystywanych zarówno w Polsce, jak i w innych krajach Europy. Badania wykonano, zasilając wytypowane do badań urządzenia gazem G25.1 (gaz G25.1 jest gazem odniesienia dla gazu ziemnego grupy S) oraz dwiema mieszaninami, które odpowiadały minimalnym i maksymalnym parametrom energetycznym gazu ziemnego grupy S. W artykule przedstawiono przybliżony skład procentowy używanych w trakcie badań gazów oraz ich parametry energetyczne. W badaniach skoncentrowano się na sprawdzeniu następujących parametrów użytkowych i bezpieczeństwa badanych urządzeń: znamionowego obciążenia cieplnego, sprawności cieplnej, jakości spalania, zapłonu, przenoszenia się i stabilności płomienia. Artykuł zawiera analizę wyników badań szczegółowo odnoszącą się do uzyskanych wartości obciążeń cieplnych i sprawności.

Słowa kluczowe: biogaz, biogaz rolniczy, mieszaniny biogazu, urządzenia gazowe.

ABSTRACT: The article presents the results of a study aimed at investigating the possibility of using a mixture of pre-treated agricultural biogas and LNG or group E natural gas in equipment adapted to burn group S natural gas. The tests have been performed on the appliances serving preparation of meals and hot water production for hygienic and heating purposes. A brief description of the gas appliances selected for testing were presented. The tested appliances had burners and gas automation have been adapted to burn group S natural gas. A gas cooker and a gas hob (equipped with two different types of burners) and two gas boilers were selected for testing. One of the boilers was equipped with a pre-mix burner and had a closed combustion chamber, while the other boiler had a kinetic-diffusion burner and an open combustion chamber. The tested appliances reflected the most popular designs of domestic gas appliances in their group, used both in Poland and in other European countries. The tests were carried out by supplying the appliances selected for testing with G25.1 gas (G25.1 gas is the reference gas for group S natural gas) and two mixtures that corresponded to the minimum and maximum energy parameters of group S natural gas. The article presents approximate percentage composition of gases used during tests and their energy parameters. The research was focused on checking the following operating parameters and the safety of tested appliances: rated heat input, thermal efficiency, combustion quality, ignition, flame stability and transfer. The article contains an analysis of the test results in detail relating to the obtained values of thermal loads and efficiency.

Keywords: biogas, agricultural biogas, biogas mixtures, gas appliances.

Wprowadzenie

W celu przeciwdziałania zmianom klimatycznym wiele państw, w tym Polska, prowadzi obecnie intensywne działania zmierzające do ograniczenia udziału paliw kopalnych w krajowym bilansie energetycznym. Jednym z kluczowych kierunków tych działań jest zwiększenie wykorzystania odnawialnych źródeł energii, w szczególności biogazu. Według Holey-Rataj i Kukulskiej-Zajac (2022a) biogaz może być pozyskiwany zasadniczo z trzech głównych źródeł:

- składowisk odpadów, przede wszystkim komunalnych;
- oczyszczalni ścieków, w których proces fermentacji obejmuje osady ściekowe;
- biogazowni rolniczych, wykorzystujących jako substraty odpady z przemysłu rolno-spożywczego oraz surowce pochodzące z upraw energetycznych przeznaczonych do tego celu.

W Polsce od wielu lat podkreśla się konieczność szerszego wykorzystania biogazu, zwłaszcza biogazu rolniczego, dla zwiększenia krajowego bezpieczeństwa energetycznego. Z danych Krajowego Ośrodka Wsparcia Rolnictwa (2023) wynika, że według stanu na 3 października 2023 r. w Polsce funkcjonowało 157 biogazowni rolniczych o łącznej rocznej wydajności szacowanej na około 613 mln m³ biogazu. Zainstalowana moc elektryczna tych instalacji wynosiła łącznie około 150,9 MW. Trwający kryzys energetyczny, pogłębiony konfliktem zbrojnym w Ukrainie, uwidoczniał konieczność intensyfikacji działań całej Unii Europejskiej, w tym Polski, w zakresie dywersyfikacji dostaw gazu oraz uniezależnienia się od importu surowców z Federacji Rosyjskiej. Jednym z efektywnych kierunków tych działań jest rozwój krajowego sektora biogazu, w szczególności biogazowni rolniczych. Zgodnie z *Porozumieniem o współpracy na rzecz rozwoju sektora biogazu i biometanu* (Porozumienie, 2021) potencjał produkcji biogazu z odpadów w Polsce szacuje się na 13–15 mld m³ rocznie, co odpowiada około 8 mld m³ biometanu. Jak wskazują Holey-Rataj i Kukulska-Zajac (2022b), możliwości praktycznego wykorzystania biogazu rolniczego są w dużej mierze determinowane jego składem chemicznym – zarówno zawartością zanieczyszczeń śladowych, jak i właściwościami fizykochemicznymi determinującymi jego wartość energetyczną. Obecnie biogaz rolniczy może być wykorzystywany do:

- produkcji energii elektrycznej w silnikach z zapłonem iskrowym lub w turbinach gazowych;
- skojarzonej produkcji energii elektrycznej i ciepłej w jednostkach kogeneracyjnych;
- produkcji energii ciepłej w kotłach gazowych;
- zasilania silników pojazdów mechanicznych oraz wtlaczania do sieci gazowych po uzdatnieniu do parametrów gazu ziemnego wysokometanowego (biometan);

- użycia w procesach technologicznych, np. w syntezie metanolu.

Wybór konkretnego sposobu zagospodarowania biogazu rolniczego zależy od szeregu czynników, spośród których kluczowe znaczenie mają:

- możliwość sprzedaży nadwyżek wyprodukowanej energii elektrycznej do sieci;
- zapotrzebowanie na energię ciepłą – zarówno technologiczną, jak i socjalną;
- odległość źródła biogazu od zakładów przemysłowych lub terenów zabudowy mieszkaniowej.

Obecnie w większości funkcjonujących biogazowni rolniczych biogaz wykorzystywany jest do skojarzonej produkcji energii elektrycznej i ciepłej w układach kogeneracyjnych (Krajowy Ośrodek Wsparcia Rolnictwa, 2023).

Głównymi składnikami biogazu rolniczego są metan (CH₄) oraz dwutlenek węgla (CO₂). Biogaz zawiera ponadto śladowe ilości siarkowodoru (H₂S), który w obecności pary wodnej – występującej w biogazie w stanie nasycenia – może prowadzić do powstawania kwasu siarkowego (H₂SO₄). Produkt ten wykazuje silne właściwości korozyjne, powodując degradację elementów instalacji gazowych. Z tego względu przed skierowaniem biogazu do użytkowania konieczne jest jego odsiarczenie oraz osuszenie.

Proces odsiarczania realizowany jest przy użyciu metod biologicznych lub chemicznych, które mogą być prowadzone zarówno bezpośrednio w bioreaktorze, jak i w zewnętrznych układach uzdatniania gazu. Oczyszczony z pary wodnej i siarkowodoru biogaz stanowi mieszaninę metanu i dwutlenku węgla, nadającą się do spalania w silnikach i turbinach gazowych lub w kotłach gazowych. Przyjmuje się, że biogaz zawierający powyżej 40% objętościowych metanu może być efektywnie wykorzystywany do celów energetycznych. Z punktu widzenia rozwoju obszarów wiejskich oraz zwiększenia udziału biogazu w krajowym bilansie energetycznym szczególnie interesującą koncepcją jest tworzenie lokalnych sieci gazowych obejmujących miejscowości położone w bezpośrednim sąsiedztwie biogazowni rolniczych. Sieci te mogłyby być zasilane mieszaniną wstępnie oczyszczonego biogazu rolniczego oraz gazu LNG lub wysokometanowego gazu ziemnego (grupa E). Rozwiązanie to pozwoliłoby na zwiększenie stopnia lokalnego wykorzystania biogazu, ograniczenie strat przesyłowych oraz redukcję emisji gazów cieplarnianych wynikających z transportu paliw kopalnych.

W dalszej części opracowania przedstawiono analizę literatury naukowej w zakresie współspalania biogazu, w szczególności biogazu rolniczego, z gazem ziemnym oraz z gazem pochodzącym z regazyfikacji LNG, ze szczególnym uwzględnieniem aspektów efektywności energetycznej i jakości procesu spalania.

Zhao i in. (2020) przedstawili wyniki badań dotyczących wpływu dodatku dwutlenku węgla do gazu ziemnego wysokometanowego na pracę domowej nagrzewnicy gazowej wyposażonej w palnik kinetyczno-dyfuzyjny. Badane urządzenie było przystosowane do spalania gazu ziemnego wysokometanowego. Autorzy analizowali wpływ obecności CO₂ w mieszance paliwowej na skuteczność zapłonu, stabilność płomienia (w tym występowanie zjawiska odrywania się płomienia), temperaturę palnika oraz emisję NO_x i CO. Wyniki badań wskazują, że problemy z zapłonem urządzenia pojawiają się przy dodaniu 10% objętościowych CO₂ do gazu ziemnego, natomiast zjawisko odrywania się płomienia obserwowano przy zawartości 30% CO₂. Autorzy wyjaśnili, że trudności w zapłonie są związane z wydłużeniem czasu zapłonu i zwiększoną zmiennością samego procesu inicjacji płomienia spowodowaną obecnością CO₂, co prowadzi do przedwczesnego ulatniania się gazów cieplarnianych (metanu), przed skutecznym zapłonem palnika. Kolejny istotny wniosek dotyczy temperatury palnika. Dodatek CO₂ do gazu ziemnego powoduje jej obniżenie, co wynika z gaszącego działania dwutlenku węgla na płomień. Efekt ten przekłada się również na emisję produktów spalania – w badaniach stwierdzono spadek emisji NO_x przy jednoczesnym wzroście emisji CO, co jest konsekwencją zmniejszonej intensywności spalania. We wcześniejszym artykule Zhao i in. (2019) opublikowali wyniki badań dotyczących zasilania przepływowego podgrzewacza wody mieszankami gazowymi opartymi na gazie ziemnym wysokometanowym, z dodatkiem wodoru lub biogazu. W eksperymentach stosowano mieszanki powstałe poprzez dodanie do gazu ziemnego 10% objętościowych CO₂ lub 20% objętościowych H₂. Analizowano stabilność płomienia, emisję CO, NO_x i węglowodorów oraz sprawność cieplną urządzenia. Badania wykazały, że zasilanie urządzenia mieszanką H₂ i gazu ziemnego zwiększa jego sprawność cieplną, co autorzy przypisują obniżeniu obciążenia cieplnego palnika. Ponadto dodatek wodoru poprawia stabilność spalania i wpływa na charakter emisji produktów spalania, wskazując na potencjał zastosowania mieszanin gazów niskoemisyjnych w urządzeniach grzewczych.

W artykule du Toit i in. (2020) opisano wyniki badań dotyczących zasilania mikroturbiny gazowej trzema różnymi paliwami: metanem (CH₄), mieszanką 15% H₂ i 85% CH₄ oraz mieszanką 20% H₂ i 80% biogazu. Mikroturbina była przystosowana do spalania gazu ziemnego wysokometanowego i stanowiła element układu kogeneracyjnego przeznaczonego do użytku w gospodarstwach domowych. Przed zastosowaniem mieszanki H₂-biogaz przeprowadzono modyfikację układu w celu zabezpieczenia przed cofaniem płomienia do systemu zasilania. W badaniach analizowano emisję CO i NO_x, moc cieplną oraz sprawność urządzenia. Wyniki wykazały, że zastosowanie mieszanki biogaz-wodór skutkowało redukcją emisji

CO o 29,8% oraz NO_x o 47,1% w porównaniu z zasilaniem metanem. Jednocześnie odnotowano spadek maksymalnej mocy cieplnej i sprawności o około 11,3% po zastąpieniu metanu mieszaniną biogaz-wodór. Autorzy podkreślają, że mieszanina biogaz-wodór może stanowić obiecującą alternatywę jako odnawialne źródło energii, zwłaszcza w przypadku, gdy wodór pochodzi ze źródeł odnawialnych. Zhao i in. (2018) przedstawili wyniki eksperymentów na palniku kuchennym zasilanym mieszaniną gazu ziemnego wysokometanowego i biogazu. Palnik był przystosowany do spalania gazu ziemnego i w trakcie badań nie wprowadzono żadnych modyfikacji jego konstrukcji. Badania przeprowadzono przy różnych poziomach zawartości CO₂ w mieszance paliwowej. Analizowano parametry pracy palnika takie jak stabilność płomienia, skuteczność zapłonu, sprawność cieplna oraz emisję CO i NO_x. Wyniki wskazują, że dodanie nie więcej niż 5% CO₂ do gazu ziemnego wysokometanowego nie wpływa znacząco na pogorszenie parametrów użytkowych palnika kuchennego. Natomiast dodanie więcej niż 10% CO₂ skutkuje skracaniem płomienia, a przy zawartości CO₂ wynoszącej 20% palnik się nie zapala. Obserwacje wykazały również, że wzrost stężenia CO₂ w gazie prowadzi do zmniejszenia emisji NO_x, a jednocześnie do zwiększenia emisji CO w spalinach.

Analiza przytoczonych badań wskazuje, że dotychczasowe prace skupiały się przede wszystkim na współspalaniu biogazu i gazu ziemnego w urządzeniach przystosowanych do spalania gazu wysokometanowego. W niniejszej pracy zaproponowano natomiast tworzenie mieszanin biogazu rolniczego z gazem LNG lub gazem ziemnym wysokometanowym grupy E odpowiadających parametrom energetycznym gazu grupy S. Gaz grupy S jest rozprowadzany m.in. na Węgrzech (Rodzaje gazu, 2004) i może zawierać od około 10% do 18% CO₂. Wprowadzenie takiego rozwiązania w Polsce wymaga jednak zmian w przepisach prawnych. Po pierwsze, konieczne jest opracowanie regulacji dopuszczających budowę i eksploatację lokalnych sieci gazowych. Po drugie, należy jednoznacznie zdefiniować parametry gazu zawierającego CO₂, który może być rozprowadzany w takich sieciach. Uwzględniając klasyfikację grup gazów zgodnie z normą PN-EN 437:2021-09, mieszanka wstępnie oczyszczonego biogazu rolniczego i gazu LNG lub gazu wysokometanowego grupy E powinna odpowiadać parametrom gazu grupy S. Takie podejście skraca istotnie drogę wprowadzenia tego gazu do użytkowania w Polsce, ponieważ:

- dostępne są już urządzenia certyfikowane do pracy z gazem grupy S (gaz stosowany na Węgrzech);
- wprowadzenie takiego gazu wymaga jedynie zgłoszenia do odpowiedniej jednostki Komisji Europejskiej, podczas gdy wprowadzenie gazu zawierającego CO₂ o odmiennych parametrach wymagałoby długiego i kosztownego procesu zatwierdzenia.

Określenie składu mieszanek do badań, badane urządzenia oraz metody badań

W tabeli 1 podano skład oraz parametry energetyczne, jakie są wymagane dla gazu ziemnego grupy S (wg Rodzaje gazu, 2004) oraz dla gazu G25.1 (wg normy PN-EN 437:2021-09). Gaz G25.1 jest gazem odniesienia dla gazu ziemnego grupy S przy badaniach prowadzonych w laboratoriach akredytowanych w celu potwierdzenia zgodności urządzeń gazowych

przeznaczonych do zasilania gazem grupy S z rozporządzeniem Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/426 z dnia 9 marca 2016 r.

Przed przystąpieniem do realizacji badań określono skład mieszanin biogazu rolniczego z gazem ziemnym pochodzącym z regazyfikacji LNG lub gazem ziemnym wysokometanowym E, którymi następnie zasilano badane urządzenia. Wyżej wymienione mieszanki komponowano na podstawie składów gazów podanych w tabeli 2. Również w tabeli 2 podano składy

Tabela 1. Wymagania dla parametrów energetycznych gazu ziemnego grupy S

Table 1. Requirements for energy parameters of group S natural gas

Parametr		Jednostka	Wartość parametru		
			minimalne wymagania dla gazu S*	gaz G25.1 (gaz odniesienia dla gazu S)**	maksymalne wymagania dla gazu S*
Skład gazu	metan	[%]	82,0	86,0	89,4
	dwutlenek węgla	[%]	18,0	14,0	10,6
Ciepło spalania, H_s		[MJ/m ³]	32,66	34,25	35,61
Wartość opałowa, H_i		[MJ/m ³]	29,43	30,87	32,09
Liczba Wobbego (górna), W_s		[MJ/m ³]	38,22	41,20	43,89
Liczba Wobbego (dolna), W_i		[MJ/m ³]	34,44	37,13	39,55
Gęstość, ρ		[kg/m ³]	0,944	0,894	0,851
Gęstość względna, d		–	0,730	0,691	0,658

Uwaga: Warunki odniesienia dla procesu spalania i objętości: $T_1 = 298,15$ K (25°C); $T_2 = 273,15$ K (0°C); $p_1 = p_2 = 101,325$ kPa.
* Na podstawie Rodzaje gazu, 2004.
** Na podstawie normy PN-EN 437:2021-09.

Tabela 2. Parametry biogazu rolniczego, gazu ziemnego wysokometanowego grupy E, gazu LNG oraz mieszanek biogazu rolniczego z gazem LNG lub gazem ziemnym wysokometanowym E

Table 2. Parameters of agricultural biogas, group E natural gas, LNG gas and mixtures of agricultural biogas with LNG gas or group E natural gas

Parametr		Jednostka	Oznaczenia gazów oraz wartość parametru						
			biogaz rolniczy	E	LNG	B+LNG _(Smin)	B+LNG _(Smax)	B+E _(Smin)	B+E _(Smax)
Skład gazu	metan	[%]	61,18	94,65	89,20	74,46	79,54	79,07	85,59
	etan		–	3,44	7,10	3,36	4,65	1,84	2,51
	propan		–	0,21	2,50	1,18	1,64	0,11	0,15
	<i>n</i> -butan		–	0,03	89,20	0,57	0,79	0,02	0,02
	<i>i</i> -butan		–	0,03	–	–	–	0,02	0,02
	<i>n</i> -pentan		–	0,01	–	–	–	0,01	0,01
	<i>i</i> -pentan		–	0,01	–	–	–	0,01	0,01
	<i>n</i> -heksan		–	0,02	–	–	–	0,01	0,01
	azot		–	1,51	–	–	–	0,81	1,10
	dwutlenek węgla		38,40	0,09	–	20,21	13,24	17,90	10,47
	tlen	0,42	–	–	0,22	0,14	0,20	0,11	
Ciepło spalania, H_s		[MJ/m ³]	24,37	40,59	44,65	33,98	37,66	32,99	36,12
Wartość opałowa, H_i		[MJ/m ³]	21,96	36,62	40,40	30,69	34,04	29,75	32,58
Liczba Wobbego (górna), W_s		[MJ/m ³]	25,25	53,32	56,12	38,23	43,90	38,22	43,89
Liczba Wobbego (dolna), W_i		[MJ/m ³]	22,76	48,10	50,77	34,53	39,68	34,47	39,59

cd. Tabela 2/cont. Table 2

Parametr	Jednostka	Oznaczenia gazów oraz wartość parametru						
		biogaz rolniczy	E	LNG	B+LNG _(Smin)	B+LNG _(Smax)	B+E _(Smin)	B+E _(Smax)
Gęstość, ρ	[kg/m ³]	1,204	0,749	0,819	1,022	0,952	0,963	0,876
Gęstość względna, d	–	0,931	0,579	0,633	0,790	0,736	0,745	0,677
Proporcje mieszania gazu E lub LNG i biogazu rolniczego	[m ³ E] lub [LNG/m ³ biogazu]	–	–	–	0,9	1,9	1,15	2,69

Uwaga: Warunki odniesienia dla procesu spalania i objętości: $T_1 = 298,15 \text{ K (} 25^\circ\text{C)}$; $T_2 = 273,15 \text{ K (} 0^\circ\text{C)}$; $p_1 = p_2 = 101,325 \text{ kPa}$.
 Biogaz rolniczy – skład procentowy biogazu rolniczego odpowiadający średniemu składowi z analiz oczyszczonego biogazu z 11 biogazowni rolniczych (dane własne INiG – PIB).
 E – średni skład gazu ziemnego wysokometanowego E w punkcie pomiaru Nr 439 Śledziejowice k. Mogiła (Gaz-System, 2022).
 LNG – gaz ziemny pochodzący z regazyfikacji LNG dla Kataru (Electric Power Research Institute, 2006).
 B+E_(Smin) – mieszanina biogazu rolniczego i gazu ziemnego wysokometanowego grupy E odpowiadająca minimalnym wymaganiom dla parametrów energetycznych gazu grupy S.
 B+E_(Smax) – mieszanina biogazu rolniczego i gazu ziemnego wysokometanowego grupy E odpowiadająca maksymalnym wymaganiom dla parametrów energetycznych gazu grupy S.
 B+LNG_(Smin) – mieszanina biogazu rolniczego i gazu ziemnego pochodzącego z regazyfikacji LNG odpowiadająca minimalnym wymaganiom dla parametrów energetycznych gazu grupy S.
 B+LNG_(Smax) – mieszanina biogazu rolniczego i gazu ziemnego pochodzącego z regazyfikacji LNG odpowiadająca maksymalnym wymaganiom dla parametrów energetycznych gazu grupy S.

mieszanek gazowych, które odpowiadają minimalnym i maksymalnym wymaganiom dla parametrów energetycznych gazu ziemnego grupy S. W normie PN-EN 437:2021-09 określono gazy do badań, które są stosowane w badaniach urządzeń gazowych w celu potwierdzenia ich zgodności z wymaganiami rozporządzenia 2016/426. Dla gazu grupy S zdefiniowano:

- gaz odniesienia (oznaczenie G25.1);
- gaz graniczny niepełnego spalania i żółtych końców (oznaczenie G26.1);
- gaz graniczny odrywania się płomienia (oznaczenie G27.1).

W tabeli 3 podano składy oraz parametry energetyczne gazów do badań dla gazu grupy S.

W normie tej określono również ciśnienia badawcze, przy których należy prowadzić badania, o następujących wartościach: $p_{nom} = 25 \text{ mbar}$, $p_{min} = 18 \text{ mbar}$, $p_{max} = 33 \text{ mbar}$.

Analizując mieszanki gazowe, których parametry podano w tabeli 2, oraz gazy do badań opisane w tabeli 3, można zauważyć, że gazy B+LNG_(Smax) i B+E_(Smax) odpowiadają parametrom energetycznym gazu granicznego niepełnego spalania, natomiast gazy B+LNG_(Smin) i B+E_(Smin) odpowiadają parametrom energetycznym gazu granicznego odrywania się płomienia. Zatem urządzenia przystosowane do spalania gazu S przy zasilaniu ich mieszaninami biogazu rolniczego z gazem ziemnym z regazyfikacji LNG lub z gazem ziemnym grupy E o parametrach energetycznych odpowiadającym wymaganiom dla parametrów energetycznych gazu grupy S powinny prawidłowo spalać te mieszaniny, biorąc pod uwagę stabilność płomienia oraz poziom emisji substancji szkodliwych (CO i NO_x) do atmosfery. Natomiast zupełnie inaczej wygląda kwestia obciążenia cieplnego oraz sprawności cieplnej urządzeń

Tabela 3. Skład oraz parametry energetyczne gazów do badań dla gazu grupy S

Table 3. Composition and energy parameters of test gases for group S gas

Parametr	Jednostka	Oznaczenia gazów oraz wartość parametru			
		G25.1	G26.1	G27.1	
Skład gazu	metan	[%]	86	80	82
	propan	[%]	–	6	–
	dwutlenek węgla	[%]	14	14	18
Ciepło spalania, H_s	[MJ/m ³]	34,25	37,93	32,66	
Wartość opałowa, H_i	[MJ/m ³]	30,87	34,30	29,43	
Liczba Wobbego (górna), W_s	[MJ/m ³]	41,20	43,76	38,22	
Liczba Wobbego (dolna), W_i	[MJ/m ³]	37,13	39,58	34,44	
Gęstość, ρ	[kg/m ³]	0,894	0,971	0,944	
Gęstość względna, d	–	0,691	0,751	0,730	

Uwaga: Warunki odniesienia dla procesu spalania i objętości: $T_1 = 298,15 \text{ K (} 25^\circ\text{C)}$; $T_2 = 273,15 \text{ K (} 0^\circ\text{C)}$; $p_1 = p_2 = 101,325 \text{ kPa}$.

Tabela 4. Różnica parametrów energetycznych pomiędzy mieszaninami pokazanymi w tabeli 2 a gazem G25.1**Table 4.** The difference in energy parameters between the mixtures shown in Table 2 and G25.1 gas

Parametr	Jednostka	Różnica pomiędzy B+LNG _(Smin) a G25.1	Różnica pomiędzy B+LNG _(Smax) a G25.1	Różnica pomiędzy B+E _(Smin) a G25.1	Różnica pomiędzy B+E _(Smax) a G25.1
Ciepło spalania, H_s	[%]	-0,8	10,0	-3,7	5,5
Wartość opałowa, H_i		-0,6	10,3	-3,6	5,5
Liczba Wobbego (górna), W_s		-7,2	6,6	-7,2	6,5
Liczba Wobbego (dolna), W_i		-7,0	6,9	-7,2	6,6
Gęstość, ρ		14,3	6,5	7,7	-2,0
Gęstość względna, d		14,3	6,5	7,8	-2,0

przystosowanych do spalania gazu S, gdy będą zasilane wyżej wymienionymi mieszaninami. Badania znamionowego obciążenia cieplnego oraz sprawności cieplnej, przy badaniach w celu potwierdzenia ich zgodności z wymaganiami rozporządzenia 2016/426 (Rozporządzenie, 2016), prowadzone są przy zasilaniu urządzeń gazem odniesienia. W tabeli 4 pokazano różnice parametrów energetycznych pomiędzy mieszaninami pokazanymi w tabeli 2 a gazem G25.1.

Analizując tabelę 4, widać, że górna liczba Wobbego dla gazów B+LNG_(Smin) i B+E_(Smin) jest niższa od górnej liczby Wobbego dla gazu G25.1 o około 7,2%, natomiast dla gazów B+LNG_(Smax) i B+E_(Smax) jest wyższa o około 6,6%. Liczba Wobbego to podstawowy parametr, który związany jest ze składem gazu, a jednocześnie decyduje o zamienności paliw gazowych.

W związku z powyższym konieczne jest sprawdzenie, jak zmienią się obciążenie cieplne oraz sprawność cieplna urządzeń przy zasilaniu ich mieszaninami B+LNG_(Smin), B+LNG_(Smax), B+E_(Smin) i B+E_(Smax). Analizując składy mieszanin gazowych podanych w tabeli 2, można zauważyć, że gazy B+LNG_(Smin) i B+LNG_(Smax) swoim składem (szczególnie pod względem zawartości węglowodorów wyższych od metanu) bardziej

odbiegają od składu gazu G25.1 niż gazy B+E_(Smin) i B+E_(Smax). W związku z tym do badań zdecydowano się wybrać gazy B+LNG_(Smin) i B+LNG_(Smax). Na potrzeby pracy, w celu wykorzystania do tworzenia mieszanek gazowych do badań mieszalni będących na wyposażeniu Zakładu Użytkowania Paliw (GU) Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego, zawężono liczbę węglowodorów w mieszkankach do trzech (metan, etan i propan), zrezygnowano z *n*-butanu. Mieszanki do badań (oznaczenie B+LNG_(Smin) oraz B+LNG_(Smax)) oparte na trzech węglowodorach skomponowano tak, aby ich liczby Wobbego odpowiadały wartości tego parametru dla mieszanek, które zawierały *n*-butan.

Ponieważ założeniem projektu badawczego było przeprowadzenie badań na urządzeniach gazowych przeznaczonych do spalania gazu ziemnego grupy S bez ich modyfikacji, ustalono, że parametrami, które są najbardziej wrażliwe na zmianę składu gazu, są parametry energetyczne oraz bezpieczeństwo pracy. Należy też zauważyć, że brak modyfikacji urządzeń gazowych wynika nie tylko z założeń projektu badawczego, ale również z definicji wymienności paliw gazowych. W związku z tym przyjęto, że w trakcie badań sprawdzane będą następujące parametry:

Tabela 5. Skład oraz parametry energetyczne mieszanek do badań**Table 5.** Composition and energy parameters of test mixtures

Parametr		Jednostka	Oznaczenia gazów oraz wartość parametru		
			G25.1	G26.1	G27.1
Skład gazu	metan	[%]	86	74,15	79,14
	etan		–	3,36	4,65
	propan		–	2,06	2,83
	dwutlenek węgla		14	20,21	13,24
	tlen		–	0,22	0,14
Ciepło spalania, H_s		[MJ/m ³]	34,25	33,98	37,65
Wartość opałowa, H_i		[MJ/m ³]	30,87	30,69	34,04
Liczba Wobbego (górna), W_s		[MJ/m ³]	41,20	38,23	43,90
Liczba Wobbego (dolna), W_i		[MJ/m ³]	37,13	34,53	39,68
Gęstość, ρ		[kg/m ³]	0,894	1,022	0,951
Gęstość względna, d		–	0,691	0,790	0,736

Uwaga: Warunki odniesienia dla procesu spalania i objętości: $T_1 = 298,15$ K (25°C); $T_2 = 273,15$ K (0°C); $p_1 = p_2 = 101,325$ kPa.

- znamionowe obciążenie cieplne QC przy nominalnym ciśnieniu zasilania $p_{nom} = 25$ mbar (według PN EN 437:2021-09), przeliczone do warunków temperatury i ciśnienia, 15°C i 1013,25 mbar (sprawność cieplna (η));
- zawartość CO i NO_x w spalinach przy maksymalnym ciśnieniu zasilania $p_{max} = 33$ mbar (według PN EN 437:2021-09);
- stabilność płomienia:
 - odrywanie płomienia przy ciśnieniu maksymalnym, $p_{max} = 33$ mbar (według PN EN 437:2021-09);
 - cofanie płomienia przy ciśnieniu minimalnym, $p_{min} = 18$ mbar (według PN EN 437:2021-09) i nastawniku mocy ustawionym w położeniu minimalnym.

Pomiary wyżej wymienionych parametrów prowadzono na podstawie procedur badawczych opisanych w normach przedmiotowych odnoszących się do badanych urządzeń. Skorzystano z następujących norm: PN-EN 30-1-1:2022-05, PN-EN 30-2-1:2015-10, PN-EN 15502-1+A1:2015-10. Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy (INiG – PIB) jest jednostką akredytowaną przez Polskie Centrum Akredytacji (PCA) do prowadzenia badań zgodnie z wyżej wymienionymi normami. Badania wykonywano, stosując aparaturę pomiarową, której niepewność pomiaru spełniała wymagania powyższych norm.

Wykaz najważniejszych przyrządów pomiarowych wykorzystanych w badaniach, mierzone parametry oraz ich dokładności pomiarowe, które nie były gorsze niż te podane w nawiasach, przedstawiono poniżej:

- analizator gazu model Horiba VA/VS-3000: NO_x: 0–200 ppm, CO: 0–500 ppm, CO₂: 0–10% (dryft zera i spanu $\pm 2,0\%$ pełnej skali przez tydzień, powtarzalność $\pm 0,5\%$ pełnej skali), O₂: 0–25% (dryft zera i spanu $\pm 1,0\%$ pełnej skali przez tydzień, powtarzalność $\pm 0,5\%$ pełnej skali);
- analizator jakości gazu model BlueEye™ EX-D: liczba Wobbego, wartość opałowa, gęstość (dokładność <1% odczytu).

Komponując potrzebne w badaniach mieszaniny gazowe, wykorzystywano mieszalnię gazów znajdującą się w Zakładzie Użytkowania Paliw INiG – PIB. Działanie mieszalni opiera się na przepływomierzach i regulatorach masowych. Jej budowa oraz oprogramowanie dają możliwość komponowania wieloskładnikowych mieszanin gazowych, w tym również zawierających wodór.

Maksymalna wydajność mieszalni to 7 m³/h. Parametry energetyczne oraz gęstość tworzonych mieszanek kontrolowano, wykorzystując analizator jakości gazu BlueEye™ EX-D, kalibrowany gazem wzorcowym.

Wybierając urządzenia do badań, starano się wytypować te, które są najczęściej wykorzystywane przez użytkowników domowych.

Z racji tego, że w gospodarstwach domowych gaz stosowany jest głównie do przygotowywania posiłków oraz do zapewnienia ciepłej wody na cele grzewcze i utrzymania higieny, do badań wytypowano następujące urządzenia:

- płytę i kuchnię gazową wyposażone w tak zwane palniki kabełkowe;
- kocioł gazowy dwufunkcyjny, wiszący, z otwartą komorą spalania, wyposażony w palnik kinetyczno-dyfuzyjny;
- kocioł gazowy dwufunkcyjny, wiszący, z zamkniętą komorą spalania, wyposażony w palnik typu pre-mix.

Badania prowadzono, zasilając urządzenia gazami G25.1, B+LNG_(Smin) i B+LNG_(Smax) bez zmiany ustawień urządzeń. Stwierdzenie „bez zmiany ustawień urządzeń” należy rozumieć tak, że badane urządzenie nie było poddawane żadnym modyfikacjom, badania były wykonywane z wykorzystaniem tych samych dysz gazowych, przy tych samych ustawieniach kurków gazowych czy też ciśnieniach przed dyszą gazową oraz przy tych samych ustawieniach nastawników powietrza do spalania.

Poniżej przedstawiono krótką charakterystykę wykorzystanych w badaniach urządzeń.

Charakterystyka badanej płyty i kuchni gazowej

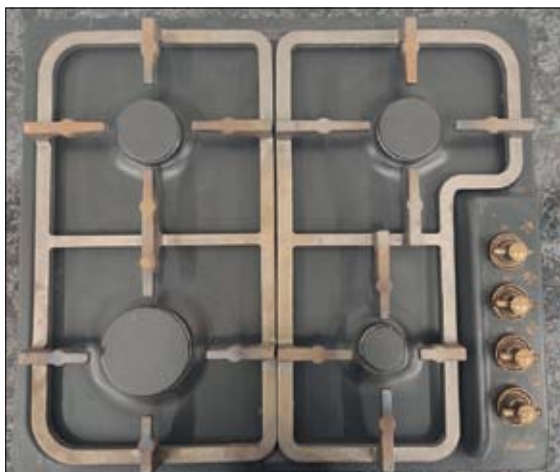
Do badań możliwości użytkowania mieszaniny wstępnie oczyszczonego biogazu rolniczego i gazu LNG lub gazu ziemnego wysokometanowego grupy E w urządzeniach przeznaczonych do spalania gazu ziemnego grupy S zostały wytypowane płyta gazowa oraz kuchnia gazowa, w których zamontowano dwa różne rodzaje tzw. palników kabełkowych. Palniki te są od kilkudziesięciu lat powszechnie montowane w płytach lub kuchniach gazowych użytku domowego. Wybór tych dwóch typów palników wynika również z faktu, że palniki innych producentów, które nie zostały uwzględnione w badaniach, mają bardzo podobną konstrukcję.

W związku z tym palniki wytypowane do badań można traktować jako próbkę reprezentatywną dla większości palników, jakie są montowane w dostępnych w sprzedaży domowych kuchniach i płytach gazowych.

Powietrze pierwotne do spalania w tzw. palnikach kabełkowych zasysane jest z dna płyty palnikowej, stąd palniki te nie mogą być montowane poniżej płyty („utopione” w płycie). Regulacja dopływu powietrza pierwotnego ze względu na rodzaj gazu realizowana jest poprzez dobranie odpowiedniej dyszy.

Dysze gazowe dla niektórych grup gazów mają specjalne konstrukcje (z podwójnym lub nawet potrójnym nawiercaniem i odpowiednio dobraną długością nawierceń).

Płyta gazowa



Rysunek 1. Widok ogólny płyty gazowej

Figure 1. General view of the gas hob

Tabela 6. Charakterystyka palników płyty gazowej

Table 6. Characteristics of gas hob burners

Oznaczenie palnika	Znamionowe obciążenie cieplne	Średnica pierścienia płomieniowego	Średnica dyszy	Rodzaj rusztu
	[W]			
mały	1000	45	0,78	żeliwny
średni	1750	65	1,00	
duży	3000	85	1,32	

Kuchnia gazowa



Rysunek 2. Widok ogólny kuchni gazowej

Figure 2. General view of the gas cooker

Tabela 7. Charakterystyka palników kuchni gazowej

Table 7. Characteristics of gas cooker burners

Oznaczenie palnika	Znamionowe obciążenie cieplne	Średnica pierścienia płomieniowego	Średnica dyszy	Rodzaj rusztu
	[W]			
mały	650	45	0,61	stalowy pręt
średni	1400	66	0,95	
duży	2400	90	1,21	

Charakterystyka badanego kotła gazowego z palnikiem pre-mix (kocioł gazowy nr 1)

Badanym urządzeniem był kondensacyjny, dwufunkcyjny kocioł gazowy z zamkniętą komorą spalania, wyposażony w palnik typu pre-mix. W nowoczesnych kotłach gazowych coraz częściej stosuje się palniki, w których strumień gazu doprowadzany do głowicy palnika jest zasysany przez przepływające powietrze, co odbywa się w zwężce Venturiego. Takie rozwiązanie umożliwia doprowadzenie do głowicy palnika wstępnie wymieszanej mieszaniny paliwowo-powietrznej. Ze względu na wysoki stopień zaawansowania technologicznego tego typu urządzeń oraz rozbudowane systemy sterowania wiele z nich umożliwia automatyczną regulację ilości powietrza doprowadzanego do spalania, między innymi z wykorzystaniem sondy λ (mierzy zawartość tlenu w spalinach), czujników temperatury spalin czy też czujników zawartości tlenku węgla w spalinach. Urządzenia wyposażone w taki układ charakteryzują się niewielką wrażliwością na zmiany jakości gazu w przewidywanym



Rysunek 3. Widok ogólny kotła gazowego nr 1

Figure 3. General view of the gas-fired heating boiler No. 1

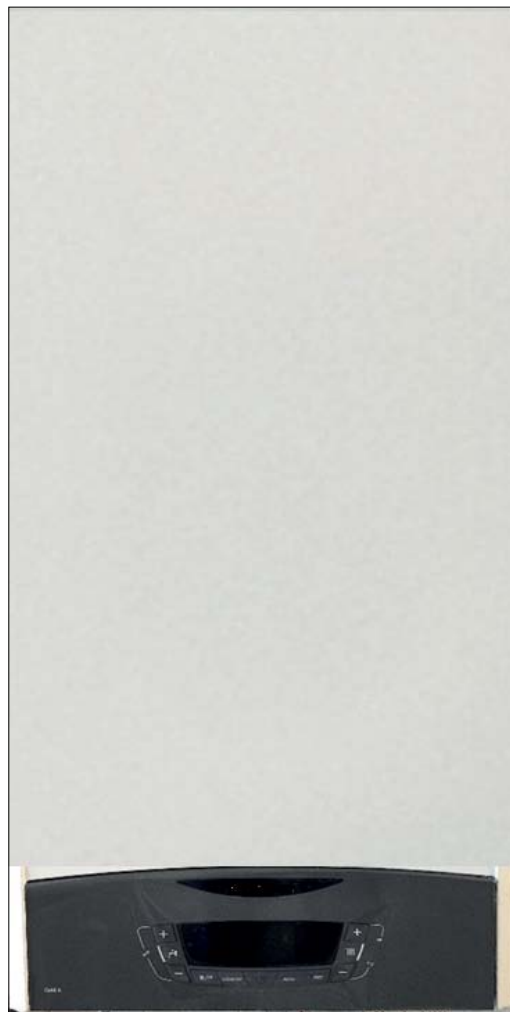


Rysunek 4. Widok wnętrza kotła gazowego nr 1
Figure 4. Interior view of the gas-fired heating boiler No. 1

zakresie parametrów. Odmiennie zachowują się urządzenia z palnikami typu pre-mix pozbawionymi sondy λ , w których stosunek gaz–powietrze ustalany jest manualnie. W ich przypadku zmiany składu gazu mogą wpływać na przebieg procesu spalania. W badaniach wykorzystano właśnie tego typu kocioł, wyposażony w palnik pre-mix bez sondy λ . Podczas testów kocioł pracował przy obciążeniu cieplnym odpowiadającym mocy 21 kW, w trybie przygotowania ciepłej wody użytkowej na cele grzewcze.

Charakterystyka badanego kotła gazowego z palnikiem kinetyczno-dyfuzyjnym (kocioł gazowy nr 2)

Badanym urządzeniem był dwufunkcyjny kocioł gazowy z otwartą komorą spalania, wyposażony w palnik kinetyczno-dyfuzyjny. W tego typu konstrukcjach ilość powietrza pierwotnego zasysanego do procesu spalania uzależniona jest



Rysunek 5. Widok ogólny kotła gazowego nr 2
Figure 5. General view of the gas-fired heating boiler No. 2

od ciśnienia gazu ustawionego na dyszy palnika. Powietrze wtórne doprowadzane jest natomiast z przestrzeni znajdującej się nad palnikiem. Zarówno powietrze pierwotne, jak i wtórne doprowadzane są do komory spalania poprzez nieszczelności występujące w konstrukcji urządzenia, a ich ilość zależy od wartości podciśnienia w przewodzie spalinowym. Znamionowe obciążenie cieplne badanego kotła dla obiegu centralnego ogrzewania mieści się w zakresie 12,0–21,1 kW.

Analiza emisji tlenku węgla (CO) oraz tlenków azotu (NO_x) przy spalaniu mieszanin biogazu z LNG lub gazem ziemnym wysokometanowym w porównaniu z gazem G25.1 (gaz odniesienia dla gazu S)

Porównując stężenie tlenku węgla (CO) w spalinach powstałych w wyniku spalania mieszanin biogazu z LNG lub gazem ziemnym wysokometanowym w badanych urządzeniach z wartościami uzyskanymi podczas spalania gazu odniesienia G25.1, zaobserwowano następujące zależności:



Rysunek 6. Widok wnętrza kotła gazowego nr 2
Figure 6. Interior view of the gas-fired heating boiler No. 2

- **Płyta gazowa:** Ani podczas badań przy znamionowym obciążeniu cieplnym, ani przy obniżonym obciążeniu cieplnym nie odnotowano istotnego wzrostu stężenia CO w spalinach dla żadnego z palników. Uzyskane wartości mieściły się w granicach dopuszczalnych przez normę PN-EN 30-1-1:2022-05, tj. 1000 ppm (0,1%) dla obciążenia znamionowego oraz 1500 ppm (0,15%) dla obciążenia obniżonego, w przeliczeniu na suche, nierozcieńczone spaliny.
- **Kuchnia gazowa:** W przypadku palników małego i dużego, zasilanych mieszaniną B+LNG_(Smax), zaobserwowano ponad dwukrotny wzrost stężenia CO w spalinach zarówno przy znamionowym, jak i obniżonym obciążeniu cieplnym. Należy jednak podkreślić, że zmierzone stężenia nie przekroczyły dopuszczalnych poziomów określonych w normie PN-EN 30-1-1:2022-05.
- **Kocioł gazowy nr 1:** Przy znamionowym obciążeniu cieplnym i zasilaniu mieszaniną B+LNG_(Smin) odnotowano ponad dwukrotny wzrost stężenia CO w spalinach. Pomimo wzrostu – wartości emisji nie przekroczyły dopuszczalnego

poziomu 1000 ppm (0,1%) określonego w normie PN-EN 15502-1:2022-04.

- **Kocioł gazowy nr 2:** Podczas pracy zasilanej mieszaniną B+LNG_(Smin) przy znamionowym obciążeniu cieplnym stężenie CO wzrosło ponad trzykrotnie w porównaniu z wartością uzyskaną dla gazu G25.1. Również w tym przypadku zmierzone stężenia nie przekroczyły granicznej wartości 1000 ppm (0,1%) określonej w przywołanej normie.

W zakresie emisji tlenków azotu (NO_x) stwierdzono, że spośród wszystkich badanych konfiguracji urządzenie–gaz jedynie w przypadku kotła gazowego nr 1 zasilanego mieszaniną B+LNG_(Smax) odnotowano istotny wzrost emisji NO_x – około 2,5-krotny, z poziomu 17,5 mg/kWh (dla gazu G25.1) do 43,5 mg/kWh. Pomimo wzrostu wartość ta nadal mieści się w granicach dopuszczalnych przez normę PN-EN 15502-1:2022-04, która określa limit emisji NO_x na poziomie 56 mg/kWh (w odniesieniu do ciepła spalania). W przypadku pozostałych badanych urządzeń nie zaobserwowano istotnych zmian stężenia tlenków azotu (NO_x) w spalinach podczas zasilania mieszaninami B+LNG_(Smin) oraz B+LNG_(Smax) w porównaniu z wartościami uzyskanymi dla gazu odniesienia G25.1. Warto również zaznaczyć, że w obowiązujących normach dotyczących płyt i kuchni gazowych nie określono wymagań dotyczących dopuszczalnego poziomu emisji NO_x. Pomimo tego w ramach przeprowadzonych badań dokonano pomiarów zawartości tlenków azotu w spalinach także dla tych urządzeń. Jako poziom odniesienia przyjęto wówczas wartości uzyskane przy spalaniu gazu G25.1, co umożliwiło ocenę wpływu stosowania mieszanin B+LNG_(Smin) i B+LNG_(Smax) na emisję NO_x.

Analiza wpływu składu mieszanin B+LNG_(Smin) i B+LNG_(Smax) na obciążenia cieplne i sprawność urządzeń gazowych

Analiza uzyskanych wartości obciążeń cieplnych jednoznacznie wskazuje, że dla mieszaniny B+LNG_(Smin), charakteryzującej się niższymi parametrami energetycznymi w porównaniu z gazem odniesienia G25.1 (gaz referencyjny dla gazu S), nastąpił spadek obciążeń cieplnych palników we wszystkich badanych urządzeniach. Na rysunkach 7–10 przedstawiono wyrażoną w procentach zmianę górnej liczby Wobbego dla mieszanek B+LNG_(Smin) oraz B+LNG_(Smax) względem gazu G25.1, a także wpływ tej różnicy na uzyskiwane obciążenia cieplne oraz sprawność cieplną palników dużego i średniego w płycie oraz kuchni gazowej. Stwierdzono, że:

- górna liczba Wobbego mieszaniny B+LNG_(Smin) była niższa o 7,2% w porównaniu z gazem G25.1;
- dla mieszaniny B+LNG_(Smax) liczba Wobbego wzrosła o 6,6%.

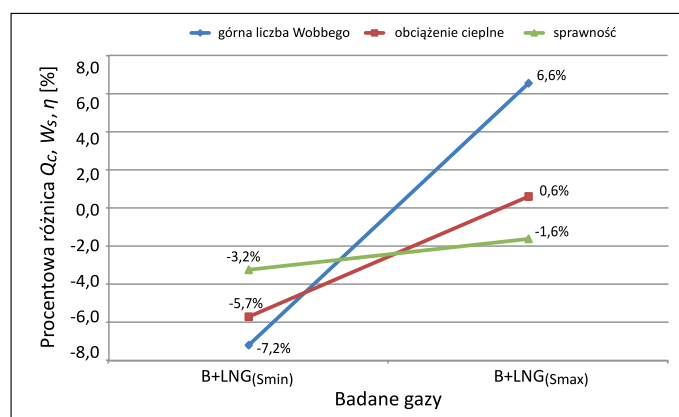
Zarówno w przypadku płyty gazowej, jak i kuchni gazowej zasilanie palników mieszaniną B+LNG_(Smin), o niższej liczbie Wobbego niż gaz odniesienia, skutkowało spadkiem obciążenia cieplnego w zakresie od 1,9% do 5,7%. Największy spadek obciążenia (5,7%) odnotowano dla palnika średniego płyty gazowej, natomiast najmniejszy (1,9%) – dla palnika dużego kuchni gazowej. Podobną tendencję zaobserwowano również podczas stosowania palników małych – w przypadku płyty gazowej obciążenie spadło o 0,8%, natomiast w przypadku kuchni gazowej – o 3,5%. Należy podkreślić, że pomimo spadków uzyskane wartości obciążeń cieplnych dla wszystkich badanych palników mieściły się w granicach dopuszczalnych odchyłek od wartości deklarowanych przez producenta określonych w odpowiednich normach odniesienia.

W przypadku płyty gazowej, jak i kuchni gazowej zasilanie palników tych urządzeń gazem B+LNG_(Smax), którego liczba Wobbego jest wyższa niż dla gazu odniesienia G25.1, spowodowało wzrost obciążenia cieplnego od 0,4% do 3,1%. Najwyższy wzrost wystąpił dla palnika dużego płyty gazowej i wyniósł 3,1%, natomiast najmniejszy – również dla palnika dużego, ale kuchni gazowej i był równy 0,4%. Ta sama tendencja została stwierdzona w przypadku palnika małego, zarówno płyty, jak i kuchni gazowej, gdzie obciążenie wzrosło odpowiednio o 1,6% i 1,1%.

Należy jednak zaznaczyć, że w przypadku żadnego badanego palnika obciążenie cieplne nie obniżyło się poniżej dopuszczalnej przez normę odniesienia odchyłki od wartości deklarowanej przez producenta.

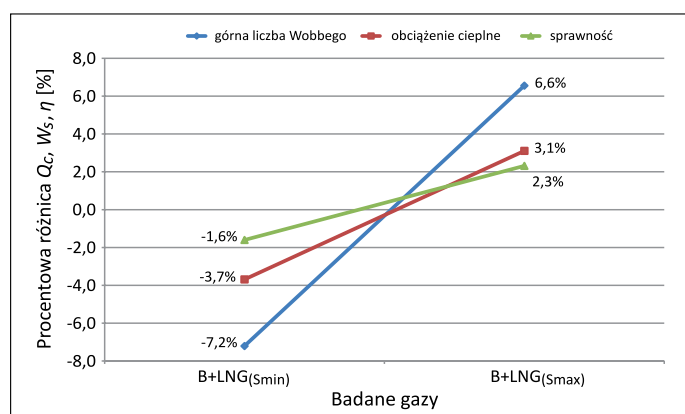
Analizując uzyskane wartości sprawności cieplnej palników średniego i dużego w płytach oraz kuchniach gazowych zasilanych mieszaninami B+LNG_(Smin) i B+LNG_(Smax), należy

zauważyć, że nie można jednoznacznie potwierdzić zależności, zgodnie z którą spadek liczby Wobbego powoduje obniżenie sprawności, a jej wzrost – podwyższenie sprawności. Zaobserwowane zmiany sprawności cieplnej odnoszone do wartości uzyskanych dla gazu referencyjnego G25.1 wykazują znacznie mniejsze odchylenia niż różnice w samej liczbie Wobbego mieszanin B+LNG_(Smin) i B+LNG_(Smax) względem gazu odniesienia. Świadczy to o tym, że sprawność cieplna badanych urządzeń wykazuje stosunkowo niską wrażliwość na zmiany parametrów energetycznych mieszanki paliwowej w analizowanym zakresie, przynajmniej w odniesieniu do wartości liczby Wobbego.



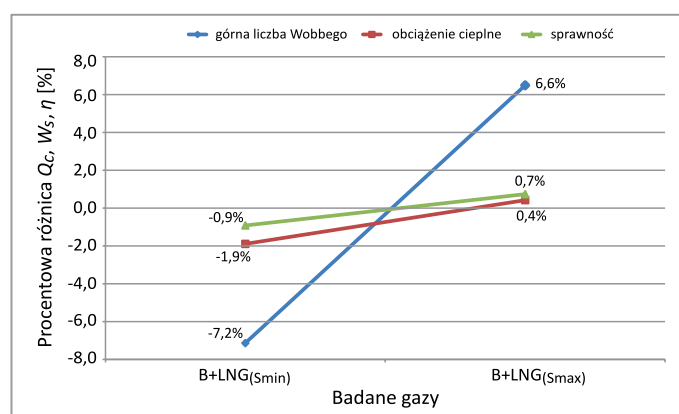
Rysunek 8. Wyrażona w procentach zmiana górnej liczby Wobbego (W_s), obciążenia cieplnego (Q_c) i sprawności cieplnej (η) badanych mieszanek B+LNG_(Smin) i B+LNG_(Smax) względem gazu G25.1 dla palnika średniego płyty gazowej

Figure 8. Percentage change of gross Wobbe index (W_s), heat input (Q_c) and thermal efficiency (η) of the tested mixtures B+LNG_(Smin) i B+LNG_(Smax) in relation to group G25.1 natural gas for gas hob semi-rapid burner



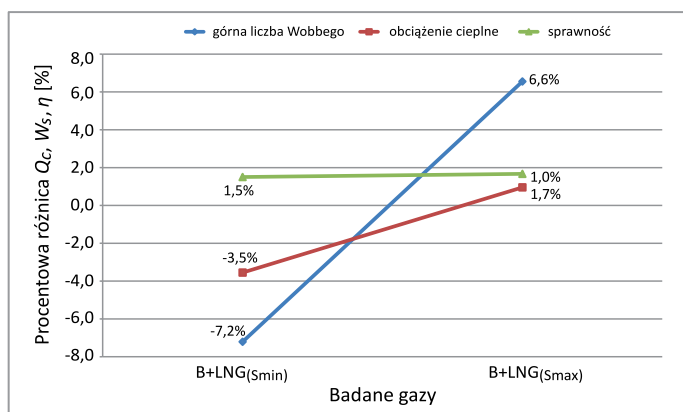
Rysunek 7. Wyrażona w procentach zmiana górnej liczby Wobbego (W_s), obciążenia cieplnego (Q_c) i sprawności cieplnej (η) badanych mieszanek B+LNG_(Smin) i B+LNG_(Smax) względem gazu G25.1 dla palnika dużego płyty gazowej

Figure 7. Percentage change of gross Wobbe index (W_s), heat input (Q_c) and thermal efficiency (η) of the tested mixtures B+LNG_(Smin) i B+LNG_(Smax) in relation to group G25.1 natural gas for gas hob rapid burner



Rysunek 9. Wyrażona w procentach zmiana górnej liczby Wobbego (W_s), obciążenia cieplnego (Q_c) i sprawności cieplnej (η) badanych mieszanek B+LNG_(Smin) i B+LNG_(Smax) względem gazu G25.1 dla palnika dużego kuchni gazowej

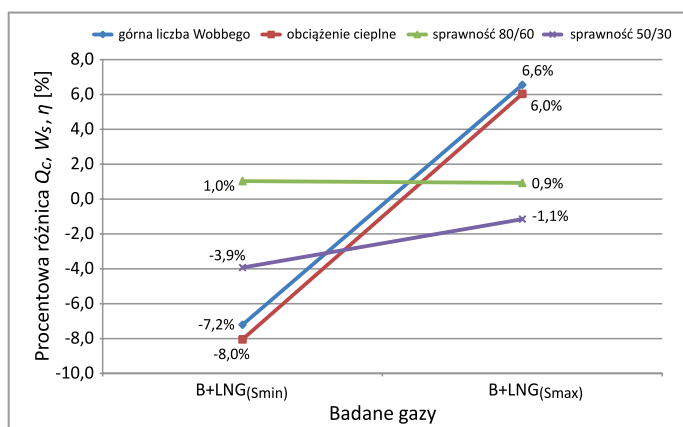
Figure 9. Percentage change of gross Wobbe index (W_s), heat input (Q_c) and thermal efficiency (η) of the tested mixtures B+LNG_(Smin) i B+LNG_(Smax) in relation to group G25.1 natural gas for gas cooker rapid burner



Rysunek 10. Wyrażona w procentach zmiana górnej liczby Wobbego (W_s), obciążenia cieplnego (Q_c) i sprawności cieplnej (η) badanych mieszanek B+LNG_(Smin) i B+LNG_(Smax) względem G25.1 dla palnika średniego kuchni gazowej

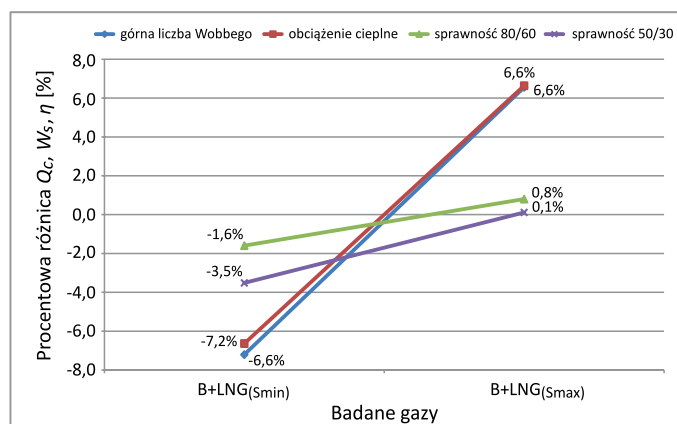
Figure 10. Percentage change of gross Wobbe index (W_s), heat input (Q_c) and thermal efficiency (η) of the tested mixtures B+LNG_(Smin) i B+LNG_(Smax) in relation to group G25.1 natural gas for gas cooker semi-rapid burner

Analiza rysunków 11 i 12, przedstawiających wyniki badań dla kotłów gazowych nr 1 i nr 2, wskazuje, że zmiana obciążenia cieplnego kotłów po zasileniu ich mieszaninami B+LNG_(Smin) oraz B+LNG_(Smax) jest wyraźnie skorelowana ze zmianą liczby Wobbego tych mieszanin względem gazu odniesienia G25.1. Warto podkreślić, że w przypadku mieszaniny B+LNG_(Smin) odnotowano spadek znamionowego obciążenia cieplnego obu kotłów poniżej wartości granicznej określonej w normie PN-EN 15502-1:2022-04. Dla kotła nr 1 zmierzone znamionowe obciążenie cieplne wyniosło 32,0 kW, podczas



Rysunek 11. Wyrażona w procentach zmiana górnej liczby Wobbego (W_s), obciążenia cieplnego (Q_c) i sprawności cieplnej (η) (w reżimie temperatury 80/60°C i 50/30°C) badanych mieszanek B+LNG_(Smin) i B+LNG_(Smax) względem gazu G25.1 dla kotła gazowego nr 1

Figure 11. Percentage change of gross Wobbe index (W_s), heat input (Q_c) and thermal efficiency (η) (in the temperature regime 80/60°C and 50/30°C) of the tested mixtures B+LNG_(Smin) and B+LNG_(Smax) in relation to group G25.1 natural gas for gas-fired heating boiler No. 1



Rysunek 12. Wyrażona w procentach zmiana górnej liczby Wobbego (W_s), obciążenia cieplnego (Q_c) i sprawności cieplnej (η) (w reżimie temperatury 80/60°C i 50/30°C) badanych mieszanek B+LNG_(Smin) i B+LNG_(Smax) względem gazu G25.1 dla kotła gazowego nr 2

Figure 12. Percentage change of gross Wobbe index (W_s), heat input (Q_c) and thermal efficiency (η) (in the temperature regime 80/60°C and 50/30°C) of the tested mixtures B+LNG_(Smin) and B+LNG_(Smax) in relation to group G25.1 natural gas for gas-fired heating boiler No. 2

gdy minimalna wartość dopuszczalna zgodnie z przywołaną normą wynosi 33,3 kW. Analogicznie dla kotła nr 2 wartość ta osiągnęła poziom 19,7 kW, przy wymaganym minimum wynoszącym 20,0 kW.

Analizując wyniki pomiarów sprawności kotłów gazowych, zauważa się, że szczególnie w przypadku zasilania urządzeń mieszaniną B+LNG_(Smin) w reżimie temperaturowym 50/30°C dochodzi do wyraźnego spadku sprawności. Dla kotła nr 1 obniżenie to wynosi 3,9%, natomiast dla kotła nr 2 – 3,5%. Warto podkreślić, że o ile w przypadku kotła nr 1 spadek sprawności nie skutkuje przekroczeniem dopuszczalnych granic określonych w normie PN-EN 15502-1:2022-04, to w przypadku kotła nr 2 odnotowano wartość poniżej wymaganego minimum. Uzyskana sprawność wyniosła 85,1%, podczas gdy wartość graniczna określona w normie wynosi 86,5%. Pozostałe wartości sprawności uzyskane dla obu kotłów mieściły się w granicach błędów pomiarowych i nie wykazywały istotnych odchyleń od wartości referencyjnych.

Wnioski z przeprowadzonych badań

Wyniki badań przeprowadzonych w ramach niniejszej pracy jednoznacznie wskazują, że w przypadku urządzeń gazowych przystosowanych do spalania gazu ziemnego grupy S możliwe jest bezpieczne i efektywne użytkowanie mieszanin biogazu rolniczego z gazem pochodzącym z regazyfikacji LNG lub gazem ziemnym wysokometanowym, pod warunkiem że parametry energetyczne tych mieszanin mieszczą się w dopuszczalnych

granicach określonych dla tej grupy gazów. Kluczowymi parametrami determinującymi bezpieczną i poprawną pracę urządzeń były:

- emisja zanieczyszczeń powstających podczas spalania (CO , NO_x);
- prawidłowy zapłon;
- przenoszenie się oraz stabilność płomienia.

W żadnym z badanych urządzeń, niezależnie od zastosowanej mieszaniny gazu, nie odnotowano przekroczenia dopuszczalnych poziomów emisji substancji szkodliwych określonych w odpowiednich normach przedmiotowych. Ponadto nie wystąpiły zakłócenia w procesach zapłonu, przenoszenia ani stabilności płomienia, co potwierdza wysoką jakość spalania oraz niezawodność działania układów palnikowych przy zastosowaniu analizowanych mieszanin gazowych.

Analiza parametrów energetycznych wykazała, że:

- dla mieszaniny $\text{B+LNG}_{(\text{Smax})}$ – zarówno osiągnięte obciążenia cieplne, jak i sprawności cieplne mieściły się w granicach dopuszczalnych wartości określonych w obowiązujących normach;
- dla mieszaniny $\text{B+LNG}_{(\text{Smin})}$ – w przypadku płyty gazowej (palnik średni i duży) oraz obu badanych kotłów gazowych zaobserwowano spadek znamionowego obciążenia cieplnego poniżej wartości granicznych normowych.

Stwierdzone obniżenie obciążenia cieplnego należy bezpośrednio powiązać ze spadkiem parametrów energetycznych zastosowanej mieszaniny ($\text{B+LNG}_{(\text{Smin})}$) względem gazu odniesienia G25.1. Jednocześnie należy podkreślić, że zgodnie z procedurami badań typu urządzeń spalających paliwa gazowe pomiary znamionowego obciążenia cieplnego prowadzi się wyłącznie z wykorzystaniem gazu odniesienia. Nie prowadzi się ich z użyciem mieszanin reprezentujących wartości skrajne (minimalne i maksymalne) parametrów energetycznych dla danej grupy gazów. W konsekwencji spadki obciążenia cieplnego zaobserwowane w warunkach eksperymentalnych należy traktować jako zjawisko normalne i typowe również w warunkach eksploatacyjnych, np. w sytuacji obniżenia kaloryczności gazu dostarczanego siecią. Analogicznie spadek sprawności cieplnej dla obu kotłów gazowych pracujących w reżimie temperaturowym $50/30^\circ\text{C}$ również należy powiązać z niższą wartością liczby Wobbego i ciepła spalania mieszaniny $\text{B+LNG}_{(\text{Smin})}$ w porównaniu z gazem odniesienia G25.1. Na podstawie uzyskanych wyników można sformułować następujące wnioski końcowe:

1. Bezpieczeństwo i niezawodność: Mieszanki biogazu rolniczego z LNG lub gazem wysokometanowym mogą być bezpiecznie stosowane w urządzeniach gazowych przystosowanych do gazu grupy S – zarówno tych starszego typu (z palnikami kinetyczno-dyfuzyjnymi), jak i nowoczesnych (z palnikami typu pre-mix).

2. Emisyjność: W żadnym z przypadków nie odnotowano przekroczeń emisji CO i NO_x ponad dopuszczalne normy, co potwierdza neutralność środowiskową analizowanych mieszanin w kontekście emisji szkodliwych substancji.
3. Parametry energetyczne: Skrajne wartości parametrów mieszanin (zwłaszcza $\text{B+LNG}_{(\text{Smin})}$) mogą powodować obniżenie sprawności i mocy cieplnej, jednak zjawisko to mieści się w ramach przewidywanej zmienności i nie wpływa na bezpieczeństwo eksploatacyjne.
4. Zalecenia aplikacyjne: Stosowanie mieszanin biogazowych o parametrach energetycznych mieszczących się w zakresie dopuszczalnym dla gazu ziemnego grupy S nie wymaga ingerencji w konstrukcję urządzeń ani ich regulacji, co czyni tę technologię atrakcyjną z punktu widzenia praktyki inżynierskiej i polityki energetycznej.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Analiza użytkowania mieszaniny biogazu i gazu LNG lub gazu ziemnego w urządzeniach przystosowanych do spalania gazu grupy S*, praca INiG – PIB; nr zlecenia: 0087/GU/2022, nr archiwalny: DK-4100-0075/2022.

Literatura

- du Toit M., Engelbrecht N., Oelofse S.P., Bessarabov D., 2020. Performance evaluation and emissions reduction of a micro gas turbine via the co-combustion of $\text{H}_2/\text{CH}_4/\text{CO}_2$ fuel blends. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 39: 100718. DOI: 10.1016/j.seta.2020.100718.
- Electric Power Research Institute, 2006. Fuel Composition Impacts on Combustion Turbine Operability. *Technical Update, March*. Gaz-System, 2022. <<https://swi.gaz-system.pl/swi/public/#!/gas/quality/params/monthly?lang=pl>> (dostęp: wrzesień 2022).
- Holewa-Rataj J., Kukulska-Zajęc E., 2022a. Biogaz rolniczy w Polsce – produkcja i możliwości wykorzystania. *Nafta-Gaz*, 78(12): 872–877. DOI: 10.18668/NG.2022.12.03.
- Holewa-Rataj J., Kukulska-Zajęc E., 2022b. Jakość biogazu rolniczego w Polsce na tle doniesień literaturowych. *Nafta-Gaz*, 78(12): 878–884. DOI: 10.18668/NG.2022.12.04.
- Krajowy Ośrodek Wsparcia Rolnictwa, 2022. Rejestr wytwórców biogazu rolniczego z dnia 8.11.2022 r.
- Porozumienie o współpracy na rzecz rozwoju sektora biogazu i biometanu. Warszawa, 23 listopada 2021 r.
- Zhao Y., Choudhury S., McDonell V., 2018. Influence of renewable gas addition to natural gas on the combustion performance of cooktop burners. *ASME 2018 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Pittsburgh, USA*. DOI: 10.1115/IMECE2018-87932.
- Zhao Y., McDonell V., Samuelsen S., 2020. Assessment of the combustion performance of a room furnace operating on pipeline natural gas mixed with simulated biogas or hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(19): 11368–11379. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.02.071.
- Zhao Y., Morales D., McDonell V., 2019. Influence of blending hydrogen and biogas into natural gas on the combustion performance of a tankless water heater. *ASME 2019 International Mechanical Engineering Congress and Exposition IMECE2019, Salt Lake City, USA*. DOI: 10.1115/IMECE2019-10792.

Akty prawne i dokumenty normatywne

PN-EN 30-2-1:2015-10 Domyne urządzenia do gotowania i pieczenia spalające paliwa gazowe – Część 2-1: Racjonalne wykorzystanie energii – Postanowienia ogólne.

PN-EN 30-1-1:2022-05 Domyne urządzenia do gotowania i pieczenia spalające gaz – Część 1-1: Bezpieczeństwo – Postanowienia ogólne.

PN-EN 437:2021-09 Gazy do badań – Ciśnienia próbne – Kategorie urządzeń.

PN-EN 15502-1:2022-04 Kotły grzewcze opalane gazem – Część 1: Ogólne wymagania i badania.

Rodzaje gazu i odpowiadające im ciśnienia zasilające zgodnie z art. 2 ust. 2 dyrektywy Rady 90/396/EWG z dnia 29 czerwca 1990 r. (Dz. Urz. UE z 1.12.2004 r., C 296/2).

Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/426 z dnia 9 marca 2016 r. w sprawie urządzeń spalających paliwa gazowe oraz uchylenia dyrektywy 2009/142/WE.



Mgr inż. Robert WOJTOWICZ
Starszy specjalista badawczo-techniczny; kierownik
Zakładu Użytkowania Paliw
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: robert.wojtowicz@inig.pl

OFERTA SZKOLENIOWA ZAKŁADU PRZESYŁANIA I DYSTRYBUCJI GAZU

Szkolenia z zakresu budowy i użytkowania rurociągów z polietylenu przy zastosowaniu technologii łączenia metodą zgrzewania doczołowego i elektrooporowego

- Szkolenia oraz egzaminy kwalifikacyjne dla personelu zgrzewającego rury i kształtki z PE wg PN-EN 13067 w INiG – PIB jako Ośrodka Szkoleniowym i Egzaminacyjnym UDT – CERT;
- Badania złączy egzaminacyjnych rur i kształtek z PE na potrzeby kwalifikacji personelu zgrzewającego wg normy PN-EN 13067 w Laboratorium Tworzyw Sztucznych INiG – PIB uznanym przez UDT;
- Szkolenia dla personelu nadzorującego budowę rurociągów z PE z zastosowaniem technologii zgrzewania doczołowego i elektrooporowego.



Kierownik: mgr inż. Piotr Szewczyk Adres: ul. Bagrowa 1, 30-733 Kraków
tel. 12 61 77 442 e-mail: szewczyk@inig.pl



INSTYTUT NAFTY I GAZU
Państwowy Instytut Badawczy