

Robert Wojtowicz

*Institut Nafty i Gazu*

## Ocena gazu granicznego G21 pod kątem jego przydatności do określenia jakości spalania gazów ziemnych wysokometanowych pochodzących z regazyfikacji LNG w urządzeniach użytku domowego

W artykule przedstawiono wyniki badań jakości spalania dla jednej kuchni i czterech płyt gazowych wyposażonych w różne palniki. Celem eksperymentu było sprawdzenie, czy na podstawie wyników badań przeprowadzonych przy użyciu gazu granicznego niezupełnego spalania G21 skontrolowane urządzenia użytku domowego można zasilać gazami ziemnymi o zwiększonej zawartości węglowodorów wyższych (głównie etanu i propanu), nie powodując pogorszenia ich jakości spalania. Badane urządzenia przystosowane były do spalania gazu ziemnego wysokometanowego – rozprowadzanego obecnie w Polsce. Do badań użyto także gazy o zawartości etanu do 20% i propanu do 5% oraz gaz G20. Składy badanych mieszanin zostały opracowane w oparciu o zawartość gazów pochodzących ze złóż na Morzu Północnym oraz gazów LNG. Są to najbardziej prawdopodobne kierunki dywersyfikacji dostaw gazu do Polski.

Słowa kluczowe: gaz ziemny, gaz graniczny niezupełnego spalania G21, LNG.

### Evaluation of limit gas G21 in terms of its suitability to evaluate the quality of combustion natural gases from LNG regasification in household devices

This paper presents combustion quality results for 1 cooker and 4 hotplates equipped with various burners. The aim of the experiment was to examine whether (based on research carried out with incomplete combustion limit gas G21) tested household devices can be powered by natural gases with increased content of higher hydrocarbons (ethane and propane mainly), without causing deterioration in the quality of combustion. The tested devices were designed to burn natural gas currently distributed in Poland. In addition to G21 gas, the tests used gases containing up to 20% of ethane and up to 5% propane and G20 gas. Configurations of test gases have been developed on the basis of gas compositions from fields in the North Sea and LNG gases. These are the most likely directions of diversification of gas supplies to the Polish market.

Key words: natural gas, incomplete combustion limit gas, LNG.

#### Wstęp

Norma PN-EN 437+A1:2010 *Gazy do badań – kategorie urządzeń – ciśnienia próbne* określa gazy do badań, ciśnienia próbne i kategorie urządzeń w odniesieniu do stosowania paliw gazowych z pierwszej, drugiej i trzeciej rodziny. Dokument ten zawiera także postanowienia, które są uwzględniane

w normach dotyczących poszczególnych urządzeń objętych zakresem dyrektywy UE 90/396/EWG, dotyczącej urządzeń spalających paliwa gazowe. Podaje on również zalecenia odnoszące się do stosowania określonych gazów i ciśnień przy przeprowadzaniu badań.

Według normy PN-EN 437+A1:2010, w badaniach typu WE (badania według norm zharmonizowanych z dyrektywą GAD 2009/142/WE) urządzeń przystosowanych do spalania gazu z rodziny drugiej Grupy E jako gaz odniesienia stosowany jest G20 (100% metanu), natomiast gazem granicznym niepełnego spalania jest w tym przypadku G21 (87% metanu i 13% propanu).

Obecnie w wielu krajach Europy toczą się dyskusje i prowadzone są badania zmierzające do uzyskania odpowiedzi na pytanie, czy gaz G21 można nadal stosować jako gaz graniczny niepełnego spalania przy badaniu urządzeń przystosowanych do spalania gazu ziemnego wysokometanowego 2E i 2H. Związane jest to z koniecznością sięgania po nowe źródła gazu ziemnego, często z tzw. złóż niekonwencjonalnych, których skład gazu odbiega od dotychczas stosowanego.

Specjaliści szacują, że światowe zasoby gazu w złożach niekonwencjonalnych, pomijając nawet wielce problematyczne hydraty metanu, są dziesięciokrotnie większe od zasobów konwencjonalnych [4]. Wątpliwości wynikają z faktu, że gazy pochodzące ze złóż Morza Północnego oraz paliwa LNG w swoich składach (tablice 1 i 2) mają większą zawartość węglowodorów wyższych niż metan (głównie etan i propan), a także dotychczas użytkowane gazy. Górna liczba Wobbe’go gazu G21 jest wyższa od tego parametru

gazów z Morza Północnego i LNG, jednak mimo to wpływ własności palnych etanu na jakość spalania w urządzeniach gazowych wymaga weryfikacji.

Wobec powyższego przeprowadzono badania jakości spalania na pięciu kuchniach i płytach gazowych wyposażonych w obecnie produkowane i najczęściej stosowane palniki gazowe. Celem pracy było sprawdzenie, czy – opierając się na badaniach przeprowadzonych gazem granicznym niepełnego spalania G21 – urządzenia użytku domowego można zasilać gazami ziemnymi o podwyższonej zawartości węglowodorów wyższych (głównie etanu i propanu), nie powodując pogorszenia ich jakości spalania.

Palniki, w które wyposażono badane urządzenia, przystosowane były do spalania gazu ziemnego wysokometanowego rozprowadzanego obecnie w Polsce. Zmiana składu gazu polegała na tym, że wytwarzane na potrzeby prób gazy ziemne zawierały znaczne ilości etanu (do 20%) i propanu (do 5%), w odróżnieniu do gazu stosowanego obecnie w naszym kraju. Składy badanych gazów zostały opracowane w oparciu o zawartość mieszanin pochodzących ze złóż na Morzu Północnym oraz gazów LNG, z uwagi na fakt, iż są to najbardziej prawdopodobne kierunki dywersyfikacji dostaw tego paliwa do Polski.

Podobne badania zostaną przeprowadzone dla palników innych urządzeń użytku domowego.

**Porównanie parametrów jakościowych gazu ziemnego rozprowadzanego aktualnie w Polsce oraz gazu, który w wyniku dywersyfikacji może być importowany**

Tablica 1. Charakterystyki gazów

Parametr	Jednostka	Gaz 2E*	Gazy Morza Północnego [1]		Gazy LNG	
			mieszanka 1	mieszanka 2		
Skład gazu	metan	%	97,7251	73,0722	89,7374	83÷99,8
	etan	%	0,7870	22,6515	5,8905	0÷14
	propan	%	0,1787	0,8437	2,2035	0÷4
	n-butan	%	0,0260	0,0247	0,5386	0÷2,5
	i-butan	%	0,0282	0,0381	0,3906	
	n-pentan	%	0,0140	0,0027	0,0864	
	i-pentan	%	0,0120	0,0063	0,1063	
	C6+		0,0100	0,0050	0,0676	
	azot	%	1,2000	0,9630	0,2829	0÷1,3
dwutlenek węgla	%	0,0190	2,3928	0,6961		
Ciepło spalania $H_s$	MJ/m <sup>3</sup>	39,80	46,00	43,83		
Wartość opałowa $H_i$	MJ/m <sup>3</sup>	35,88	41,70	39,64		
Liczba Wobbe’go (górna) $W_s$	MJ/m <sup>3</sup>	52,83	54,84	55,03		
Liczba Wobbe’go (dolna) $W_i$	MJ/m <sup>3</sup>	47,63	49,71	49,77		
Gęstość bezwzględna $\rho$	kg/m <sup>3</sup>	0,734	0,909	0,820		
Gęstość względna $d$	-	0,567	0,704	0,634		

Uwaga: wartości wielkości fizykochemicznych podane dla warunków odniesienia:  $t = 25^\circ\text{C}/0^\circ\text{C}$  i  $p = 1013,25$  mbar.

\* Przykładowy skład gazu ziemnego wysokometanowego używanego aktualnie w Polsce [1].

W Polsce od kilku lat toczy się dyskusja na temat dywersyfikacji dostaw gazu i zmniejszenia uzależnienia od dostaw z Rosji oraz większego wykorzystania własnych zasobów. Wynikiem politycznych i gospodarczych dyskusji oraz analizy obecnej sytuacji w zakresie dostaw nośników energetycznych, a szczególnie gazu ziemnego, było przyjęcie przez Radę Ministrów polityki energetycznej Polski do 2030 roku oraz podjęcie działań zmierzających do zapewnienia niezawodności dostaw tego paliwa [3].

Oprócz zwiększenia wykorzystania gazu ze źródeł krajowych rozważa się także import mieszanin pochodzących z Morza Północnego oraz skroplonego gazu ziemnego (LNG).

W tabelicy 1 porównano przykładowy skład gazu ziemnego wysokometanowego aktualnie dostarczanego w Polsce

odbiorcom, ze składami gazów ziemnych, które w wyniku dywersyfikacji dostaw mogą pojawić się w polskim systemie gazowniczym. Dla porównania w tabelicy 2 zamieszczono charakterystyki gazów LNG pochodzących z różnych stron świata.

Analizując zawarte w tablicach 1 i 2 dane, można zauważyć, że gazy pochodzące z rejonu Morza Północnego, a także LNG mogą zawierać kilka, a nawet kilkadziesiąt razy więcej węglowodorów wyższych niż metan. Udział procentowy etanu w tych gazach dochodzi do ok. 22%, a zawartość propanu może sięgać nawet 6%.

W tabelicy 2 przedstawiono składy procentowe oraz główne parametry energetyczne gazów LNG pochodzących z różnych stron świata.

Tablica 2. LNG z różnych źródeł [2]

Pochodzenie LNG	Skład				$H_s$	$H_i$	$W_s$ (górna)	$\rho$	$d$
	metan	etan	propan	C4+					
	[% mol]								
Brunei	89,76	4,75	3,20	2,29	45,40	41,10	56,50	0,835	0,646
Trynidad	96,14	3,40	0,39	0,07	41,17	37,15	54,22	0,746	0,578
Algieria	88,83	8,61	2,18	0,38	44,15	39,92	55,85	0,808	0,625
Indonezja	90,18	6,41	2,38	1,03	44,22	39,98	55,88	0,809	0,626
Nigeria	90,53	5,05	2,95	1,47	44,57	40,31	56,06	0,817	0,632
Katar	89,27	7,07	2,50	1,16	44,61	40,36	56,09	0,818	0,633
Abu Dhabi	85,96	12,57	1,33	0,14	44,61	40,36	56,10	0,818	0,632
Malezja	87,64	6,88	3,98	1,50	45,78	41,45	56,71	0,843	0,652
Australia	86,41	9,04	3,60	0,95	45,69	41,37	56,67	0,841	0,650
Oman	86,61	8,31	3,32	1,76	46,06	41,71	56,86	0,848	0,656

Uwaga: wartości wielkości fizykochemicznych podane dla warunków odniesienia:  $t = 25^\circ\text{C}/0^\circ\text{C}$  i  $p = 1013,25$  mbar.

### Określenie składu gazów użytych w badaniach

W tablicach 1 i 2 pokazano składy gazu ziemnego wysokometanowego, który w wyniku dywersyfikacji dostaw może w niedługim czasie pojawić się w polskim systemie przesyłowym i dystrybucyjnym gazu ziemnego.

Wszystkie mieszaniny prezentowane w tablicach 1 i 2 zaliczane są do rodziny drugiej, a więc gazem odniesienia – zgodnie z normą PN-EN 437+A1:2010 – jest G20, czyli metan. Podstawowym problemem w przypadku zasilania urządzeń gazami „bogatymi”, do których należy zaliczyć gaz z Morza Północnego i z regazyfikacji LNG, jest jakość spalania. Wobec powyższego, jako gaz porównawczy, według normy PN-EN 437+A1:2010, powinien być stosowany gaz graniczny niezupełnego spalania G21, który jest mieszaniną 87% metanu i 13% propanu.

G20 i G21 są gazami znormalizowanymi o określonych

składach. Jak wynika z tabelicy 3, tworzone są one w oparciu o metan i propan, czyli nie uwzględniają wpływu na jakość spalania etanu zawartego w gazie ziemnym wysokometanowym.

Należy również przypomnieć, że górna granica liczby Wobbe'go dla gazu E w normie PN-C-04753:2011 *Gaz ziemny – Jakość gazu dostarczanego odbiorcom z sieci rozdzielczej* została rozszerzona do wartości 56,9 MJ/m<sup>3</sup> (25°C/0°C/1013,25 mbar), czyli przewiduje wprowadzanie do sieci dystrybucyjnej gazów ziemnych z większą zawartością wyższych węglowodorów niż metan. Analizując powyższe uwarunkowania, do badań przyjęto następujące gazy testowe i mieszaniny gazowe:

- gaz testowy G20 – jako gaz odniesienia dla sprawdzenia znamionowego obciążenia cieplnego badanych urządzeń i ewentualnego korygowania nastaw w taki

Tablica 3. Gazy do badań według normy PN-EN 437+A1:2010

Gazy do badań	Oznaczenie gazu	Skład objętościowy [%]	$H_i$ [MJ/m <sup>3</sup> ]	$W_i$ [MJ/m <sup>3</sup> ]	$H_s$ [MJ/m <sup>3</sup> ]	$W_s$ [MJ/m <sup>3</sup> ]	$d$
Gaz odniesienia	G20	CH <sub>4</sub> = 100	35,90	48,20	39,94	53,61	0,555
Gaz graniczny niepełnego spalania	G21	CH <sub>4</sub> = 87 C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> = 13	43,33	52,36	47,80	57,76	0,685

Uwaga: parametry energetyczne oraz gęstość podano dla warunków odniesienia: 0°C i  $p = 1013,25$  mbar.

- sposób, aby zmiana gazu następowała zawsze przy znamionowych nastawach, które w dalszych badaniach nie ulegają zmianom,
- gaz testowy G21 – czyli gaz graniczny niepełnego spalania stosowany w badaniach typu WE urządzeń przystosowanych do spalania gazu ziemnego wysokometanowego Grupy E,
  - mieszanki o zwiększającej się zawartości etanu i propanu, symulujące składy gazów z Morza Północnego i LNG:
    - 90% metanu + 7% etanu + 3% propanu (oznaczenie gazu: G73),
    - 80% metanu + 15% etanu + 5% propanu (oznaczenie gazu: G155),
    - 76% metanu + 20% etanu + 4% propanu (oznaczenie gazu: G204).
- Przyjęto również, że istotnym parametrem, którego zmiany w urządzeniach należy zbadać, będzie stężenie CO przy ciśnieniu nominalnym i maksymalnym.

Tablica 4. Parametry gazów testowych oraz gazów o podwyższonej zawartości etanu i propanu

Parametr	Jednostka	Oznaczenia gazów oraz wartość parametru					
		G20	G21	G73	G155	G204	
Skład gazu	metan	%	100	87	90	80	76
	etan	%	-	-	7	15	20
	propan	%	-	13	3	5	4
	n-butan	%	-	-	-	-	-
	i-butan	%	-	-	-	-	-
	n-pentan	%	-	-	-	-	-
	i-pentan	%	-	-	-	-	-
	azot	%	-	-	-	-	-
	dwutlenek węgla	%	-	-	-	-	-
Ciepło spalania $H_s$	MJ/m <sup>3</sup>	39,94	47,80	43,81	47,47	48,38	
Wartość opałowa $H_i$	MJ/m <sup>3</sup>	35,90	43,33	39,61	43,03	43,88	
Liczba Wobbe’go (górna) $W_s$	MJ/m <sup>3</sup>	53,61	57,76	55,66	57,62	58,10	
Liczba Wobbe’go (dolna) $W_i$	MJ/m <sup>3</sup>	48,20	52,36	50,32	52,22	52,69	
Gęstość $\rho$	kg/m <sup>3</sup>	0,717	0,885	0,801	0,878	0,897	
Gęstość względna $d$	-	0,555	0,685	0,619	0,679	0,694	

Uwaga: parametry energetyczne oraz gęstość podano dla warunków odniesienia: 0°C i  $p = 1013,25$  mbar.

### Opis stanowisk oraz procedur badawczych stosowanych w badaniach palników płyt i kuchni gazowych

Na potrzeby badań adoptowano procedury badawcze zawarte w normie PN-EN 30-1-1 [5].

#### Pomiar obciążenia cieplnego

Weryfikację obciążenia cieplnego każdego urządzenia przeprowadzano z użyciem gazu odniesienia G20, przy ciśnieniu nominalnym, z zastosowaniem odpowiednich dysz.

Pomiar przeprowadzono między 10. a 13. minutą, licząc od uruchomienia palnika, mierząc strumień objętości zużytego gazu. Jeżeli uzyskiwane obciążenie ciepłe różniło się więcej niż o  $\pm 2\%$  od obciążenia cieplnego deklarowanego przez producenta przy nominalnym ciśnieniu zasilania  $p_{nom} = 20$  mbar, dokonywano jego korekty w celu uzyskania wymaganego obciążenia cieplnego dla danego palnika.

Uzyskaną w ten sposób wartość ciśnienia nazwano  $p_{nomsk}$ , a odpowiadające mu ciśnienie minimalne  $p_{min}$  i maksymalne  $p_{max}$  nazwano odpowiednio:  $p_{minsk}$  i  $p_{maxsk}$ . Poszczególne wartości ciśnienia muszą spełniać zależność:

$$\frac{P_{nomsk}}{P_{nom}} = \frac{P_{minsk}}{P_{min}} = \frac{P_{maxsk}}{P_{max}} \quad (1)$$

Obciążenie cieplne  $Q_n$ , wskazane przez producenta, określono na podstawie następującego równania [5]:

$$Q_n = 0,278 \cdot V_n \cdot H_s \quad (2)$$

gdzie:

$Q_n$  – obciążenie cieplne [kW],

$V_n$  – strumień objętości zużytego gazu [ $m^3$ /godz.],

$H_s$  – ciepło spalania gazu odniesienia [ $MJ/m^3$ ].

Strumień objętości gazu  $V_n$  obliczano za pomocą równania:

$$V_n = V_{mes} \cdot \left[ \frac{(p_a + p - p_s)}{1013,25} \cdot \frac{288,15}{(273,15 + t_g)} \right] \quad (3)$$

gdzie:

$V_{mes}$  – zmierzony strumień objętości gazu w warunkach badania [ $m^3$ /godz.],

$p_a$  – ciśnienie atmosferyczne [mbar],

$p$  – ciśnienie zasilania gazem w punkcie pomiarowym [mbar],

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

$p_{ws}$  – ciśnienie pary nasyconej wody w temperaturze  $t_g$  [mbar],

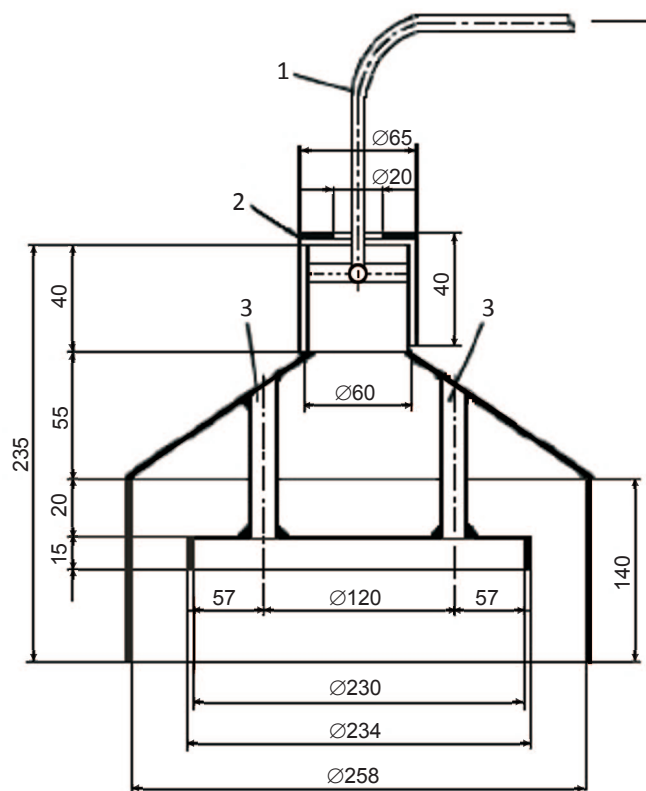
W związku z tym, że w badaniach stosowany był gazomierz mokry, ciśnienie pary nasyconej wody w temperaturze  $t_g$  obliczano z równania:

$$p_{ws} = \exp \left( 21,094 - \frac{5262}{273,15 + t_g} \right) \quad (4)$$

Obciążenie cieplne dla wszystkich badanych gazów było określone dla skorygowanych ciśnień: nominalnego i maksymalnego.

### Pomiar jakości spalania

Pomiar zawartości CO w spalinach wykonywano w pierwszej kolejności przy zasilaniu urządzenia gazem odniesienia G20, przy takim ciśnieniu zasilania, które spowodowało, że obciążenie cieplne uzyskiwane przez każdy palnik było równe obciążeniu cieplnemu deklarowanemu przez producenta, z odchyleniem  $\pm 2\%$ . Następnie, nie zmieniając ustawień palnika oraz ciśnienia zasilania, gaz G20 zastępowany był kolejno mieszaninami: G21, G73, G155 i G204, po czym ponownie mierzono zawartość CO w spalinach. Te same pomiary powtórzono dla wszystkich gazów zamieszczono-



Rys. 1. Przyrząd do pobierania próbek spalin z garnkiem o średnicy 220 mm

1 – rurka miedziana o średnicy 8 mm, 2 – przysłona, 3 – rura stalowa o średnicy 22 mm

nych w tablicy 4, zmieniając jedynie ciśnienie zasilania na ciśnienie maksymalne.

Pobieranie próbek spalin przeprowadzono z wykorzystaniem okrągłego garnka o średnicy 220 mm, który przykrywano był urządzeniem do pobierania próbek spalin, pokazanym na rysunku 1 [5].

Próbki spalin pobierano poprzez zasysanie gazów z górnej części urządzenia do pobierania próbek po 20 min od rozpoczęcia badania.

Stężenie objętościowe CO w suchych i nierozcieńczonych powietrzem spalinach (spalanie stechiometryczne) określano wzorem [5]:

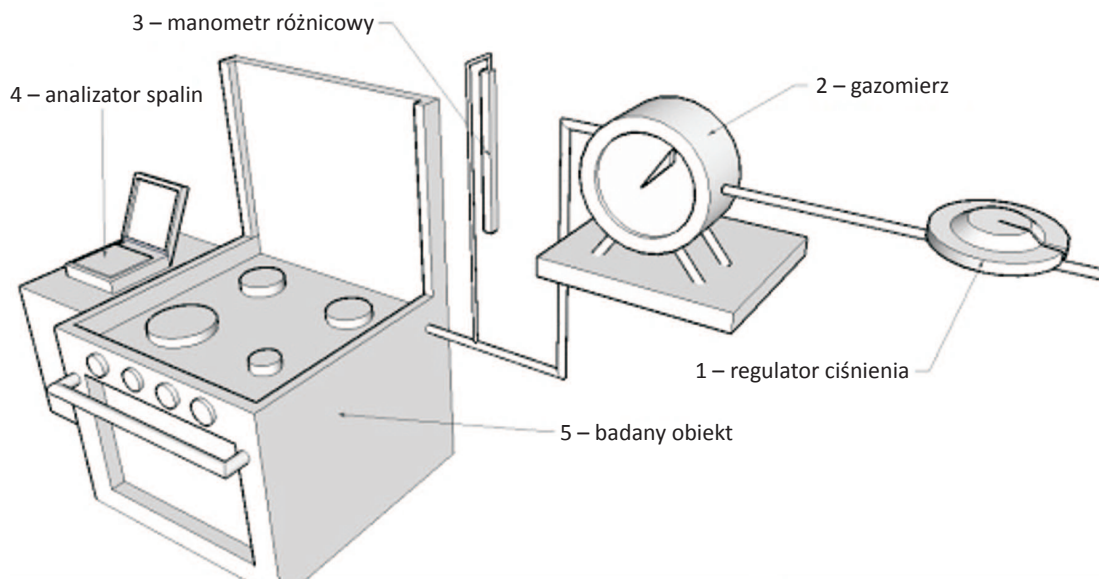
$$(CO)_N = (CO)_M \times \frac{(CO_2)_N}{(CO_2)_M} \quad (5)$$

gdzie:

$(CO)_N$  – procentowe stężenie objętościowe tlenku węgla(II) w suchych, nierozcieńczonych powietrzem spalinach,

$(CO_2)_N$  – procentowe stężenie objętościowe tlenku węgla(IV), obliczone dla suchych, nierozcieńczonych powietrzem spalin,

$(CO)_M$  i  $(CO_2)_M$  – procentowe stężenia objętościowe tlenku węgla(II) i tlenku węgla(IV), zmierzone w próbkach spalin suchych podczas badania.



Rys. 2. Schemat stanowiska do badania kuchni gazowej

Schemat stanowiska do badań kuchni gazowych przedstawiono na rysunku 2. Do podstawowych elementów stanowiska należą: 1 – regulator ciśnienia, 2 – gazomierz mokry, 3 – manometr różnicowy, 4 – analizator spalin.

**Wybór urządzeń do badań**

Do badań wytypowano urządzenia z palnikami „kubelkowymi” (cztery urządzenia) oraz palnikami fajkowymi (jedno urządzenie). Palniki pochodziły od pięciu różnych producentów, którzy pokrywają ok. 90% zapotrzebowania rynku.

Ze względu na sposób tworzenia mieszanki powietrzno-gazowej wszystkie badane palniki są palnikami kinetyczno-dyfuzyjnymi.

W palnikach „kubelkowych” powietrze pierwotne do spalania zasysane jest z dna płyty palnikowej, stąd palniki te nie mogą być „utopione” w płycie, a najlepiej pracują

w modnych ostatnio szklanych lub ceramicznych płaskich płytach podpalnikowych. Regulacja dopływu powietrza pierwotnego ze względu na rodzaj gazu realizowana jest poprzez specjalne konstrukcje dysz (z podwójnym lub nawet potrójnym nawiercaniem i odpowiednio dobraną wysokością).

Drugi typ palników „kubelkowych” charakteryzuje się tym, że ich „kubelkowa” część pełniąc rolę inżektora wytłoczona jest bezpośrednio w płycie podpalnikowej.

Palniki fajkowe posiadają inżektor zamontowany pod płytą podpalnikową, w związku z tym powietrze pierwotne zasysane jest z przestrzeni znajdującej się pod nią.

Przy doborze urządzeń do badań brano pod uwagę również odległość otworów płomykowych palnika od dna garnka. Dobierano urządzenia, w których odległość ta jest możliwie najmniejsza, z uwagi na to, że minimalizowanie odległości powoduje powstawanie gorszych warunków spalania.

**Charakterystyka urządzeń wytypowanych do badań**

Tablica 5. Płyty gazowe nr 1 i 2

Parametr charakterystyczny	Jednostka	Płyta gazowa nr 1			Płyta gazowa nr 2			
		palniki			palniki			
		mały	średni	duży	mały	średni	duży	bardzo duży
Deklarowana moc palnika	kW	0,55	1,4	2,4	0,85	1,5	2,2	3,5
Wymiar pierścienia płomieniowego	mm	38	61	86	40	68	90	127
Średnica dyszy	mm	0,56	0,86	1,12	0,62	0,85	1,2	1,4
Odległość otworów płomykowych od dna garnka	mm	13	14	15	23	24	24	20
Rodzaj rusztu	-	stalowy pręt emaliowany			żeliwny			

Tablica 6. Płyty gazowe nr 3 i 4

Parametr charakterystyczny	Jednostka	Płyta gazowa nr 3			Płyta gazowa nr 4		
		palniki			palniki		
		mały	średni	bardzo duży	mały	średni	bardzo duży
Deklarowana moc palnika	kW	1,05	1,8	3,3	0,9	1,75	2,7
Wymiar pierścienia płomieniowego	mm	40	54	123	45	65	125
Średnica dyszy	mm	0,73	0,92	1,3	0,69	0,97	1,24
Odległość otworów płomykowych od dna garnka	mm	18	18	17	13	13	16,5
Rodzaj rusztu	-	stalowy pręt emaliowany			stalowy		

Tablica 7. Kuchnia gazowa

Parametr charakterystyczny	Jednostka	Kuchnia gazowa		
		palniki		
		mały	średni	bardzo duży
Deklarowana moc palnika	kW	0,6	1,4	2,4
Wymiar pierścienia płomieniowego	mm	45	65	90
Średnica dyszy	mm	0,55	0,85	1,07
Odległość otworów płomykowych od dna garnka	mm	16	18	19
Rodzaj rusztu	-	stalowy pręt emaliowany		

## Wyniki pomiarów

### Badania kształtu płomienia wykonane na palniku Bunsena

W badaniach typu WE urządzeń przystosowanych do spalania gazu ziemnego wysokometanowego 2E jako gaz odniesienia stosowany jest G20, natomiast gazem granicznym niezupełnego spalania jest mieszanina G21, o składzie 87% metanu i 13% propanu. Gaz ten, jak wynika z tablicy 8, potrzebuje o 1,86 m<sup>3</sup> więcej powietrza do spalania niż gaz odniesienia G20 (w praktyce jest to czysty metan).

Tablica 8. Teoretyczne zapotrzebowanie powietrza do spalania oraz maksymalna szybkość spalania gazów użytych w badaniach

Gaz	Zapotrzebowanie powietrza*	Maksymalna szybkość spalania* $S_{Lmax}$
	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	[m/s]
G20	9,52	44,80
G21	11,38	45,01
G73	10,45	45,04
G155	11,31	45,30
G204	11,52	45,42

\* Obliczenia własne na podstawie wzoru 6 i tablicy 9.

Szybkość spalania mieszanin gazów jest określona przez zawartość procentową i szybkość spalania składników. Jej przybliżoną wartość można obliczyć przy pomocy następującego wzoru [6]:

$$S_L = \frac{n_1 S_{n1} + n_2 S_{n2} + \dots}{n_1 + n_2 + \dots} \quad (6)$$

gdzie:

$n_1, n_2$  – procentowa zawartość składników w mieszaninie palnej.

Tablica 9. Maksymalna szybkość spalania wybranych gazów palnych [6]

Gaz	Symbol chemiczny	Współczynnik nadmiaru powietrza dla $S_{Lmax}$	$S_{Lmax}$ [cm/s]
Metan	CH <sub>4</sub>	1,08	44,8
Etan	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1,14	47,6
Propan	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1,06	46,4

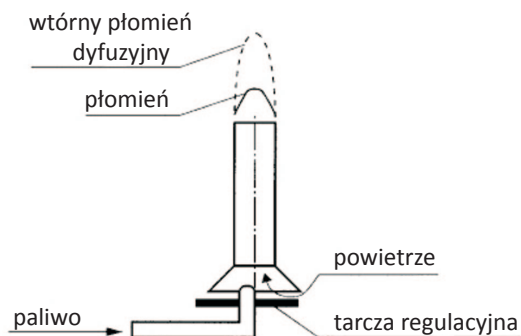
Jak wynika z tablicy 8, gaz G21 oraz mieszaniny G155 i G204 mają bardzo podobne własności palne (zarówno zapotrzebowanie powietrza, jak i szybkość spalania). W związku z tym, na jakość spalania gazów w palnikach kinetyczno-

dyfuzyjnych, jakimi są palniki stosowane w kuchniach gazowych, będzie miało wpływ zassanie powietrza pierwotnego.

Bardzo ważną kwestią oddziałującą na prawidłowe spalanie ww. gazów w palnikach kuchni gazowych jest długość płomienia oraz jego usytuowanie względem dna garnka. Gdy płomień opiera się o dno garnka, następuje zbyt szybkie jego chłodzenie oraz utrudniony jest dostęp powietrza wtórnego, co prowadzi do wzrostu emisji tlenku węgla.

W trakcie realizacji poprzednich prac wykonywanych w Zakładzie Użytkowania Paliw INiG na palnikach kuchni gazowych zaobserwowano, że płomienie przy spalaniu gazów G155 i G204 wydłużają się w porównaniu z płomieniami z gazu G20. W związku z tym przeprowadzono doświadczenie polegające na spalaniu gazów G20, G21, G73, G155 oraz G204 w palniku Bunsena, przy jednoczesnym pomiarze wysokości stożka płomienia (fotografia 1). Schemat palnika Bunsena użytego do pomiarów pokazano na rysunku 3.

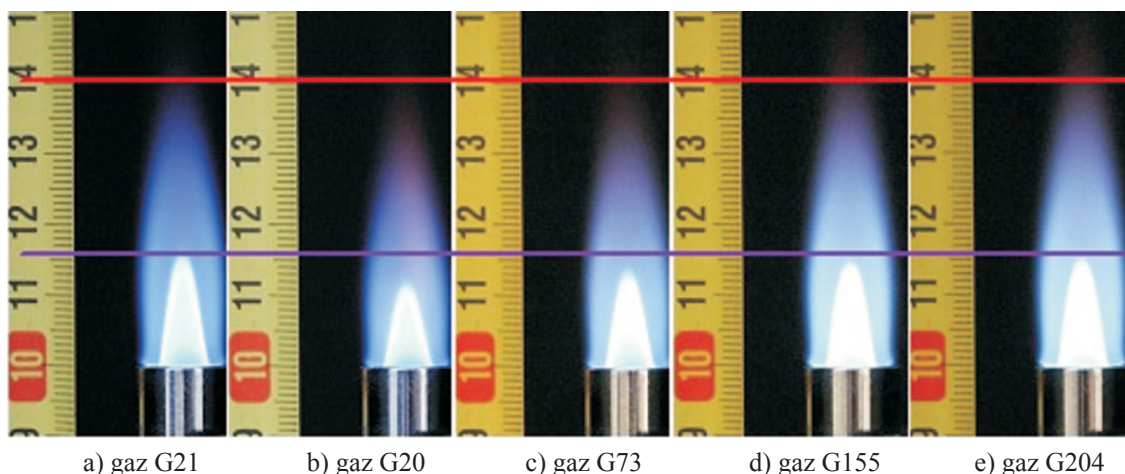
Ustawienia palnika Bunsena w trakcie wykonywania pomiarów pozostawały bez zmian, tzn. pomiary wykonywano na tej samej dyszy, przy tym samym ustawieniu przesłony



Rys. 3. Schemat palnika Bunsena

Porównując płomienie uzyskane dla gazu G21 i mieszanin G155 oraz G204, przy tym samym ustawieniu palnika, można zaobserwować pewne różnice. Dotyczą one zarówno stożków płomieni, jak i wtórnych płomieni dyfuzyjnych, co wyraźnie można zaobserwować na fotografii 2.

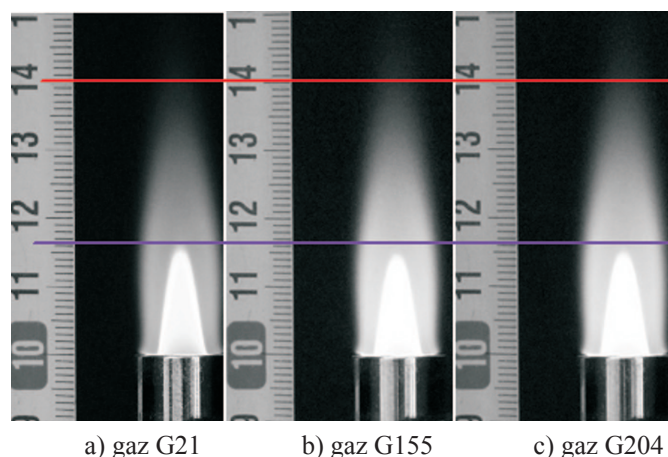
Stożki płomieni dla gazów G155 i G204 są krótsze w porównaniu ze stożkiem płomienia dla paliwa G21, natomiast wtórne płomienie dyfuzyjne odwrotnie: są dłuższe i nieznacznie szersze.



Fot. 1. Płomienie uzyskane na palniku Bunsena dla różnych gazów

powietrza, również stałe było ciśnienie gazu, którym zasilano palnik (wynosiło ono 20 mbar). Przesłonę powietrza ustawiono w taki sposób, aby palnik zasysał w wyniku iniekcji ok. 50% powietrza potrzebnego do spalania (tzw. powietrza pierwotnego) dla gazu G20, imitując w ten sposób pracę palników montowanych w kuchniach gazowych użytku domowego.

Przyglądając się fotografii 1, można stwierdzić, że płomienie ze spalania gazów G20 i G73 są krótsze od płomienia G21. Odnosi się to zarówno do płomienia kinetycznego (wewnętrznego), jak i dyfuzyjnego (zewnętrznego). Związane jest to przede wszystkim z różnicą w parametrach energetycznych ww. gazów (tablica 4) oraz z mniejszym zapotrzebowaniem powietrza do spalania przez gazy G20 i G73.



Fot. 2. Płomienie uzyskane na palniku Bunsena dla gazów: G21, G155, G204



Krótsze są stożki płomienia dla gazów G155 i G204 są niewątpliwie spowodowane większą szybkością ich spalania w porównaniu z gazem G21 (tablica 8).

Na kształt wtórnego płomienia dyfuzyjnego niewielki wpływ ma szybkość spalania gazów, natomiast dominującą rolę odgrywa powolny proces dyfuzji, który odpowiedzialny jest za dostarczanie tlenu do spalania pozostałych części palnych. Im większa ilość tlenu zostanie dostarczona na tym etapie spalania, tym płomień będzie dłuższy. W związku z tym, kształt wtórnego płomienia dyfuzyjnego należy powiązać z ilością zassania powietrza pierwotnego do

spalania, jak i z całkowitym zapotrzebowaniem powietrza do spalania. Rozszerzanie i wydłużanie się wtórnego płomienia dyfuzyjnego dla gazów G155 i G204 świadczy o tym, że gazy te potrzebują więcej powietrza do spalania dostarczanego na drodze dyfuzji niż gaz G21. Dodatkowo gaz G204 ma największe zapotrzebowanie powietrza do spalania spośród badanych gazów, stąd jego płomień jest największy.

Opisane powyżej zjawisko zostało sprawdzone na wytynowanych płytach i kuchniach gazowych, a wyniki pomiarów przedstawiono w poniższych tablicach.

Tablica 10. Ciśnienia badawcze, obciążenia cieplne i zawartość CO dla płyty gazowej nr 1

Ciśnienie badawcze [mbar]						
Nazwa		Ciśnienie nominalne skorygowane	Ciśnienie minimalne skorygowane	Ciśnienie maksymalne skorygowane		
Oznaczenie		$P_{nomsk}$	$P_{minsk}$	$P_{maxsk}$		
Palnik	duży	25	20,0	31,3		
	średni	26	20,8	32,5		
	mały	25	20,0	31,3		
Obciążenie cieplne przy $P_{nomsk}$ ( $Q_{rzecz}$ ) [W]						
Oznaczenie gazu		G20	G21	G73	G155	G204
Palnik	duży	2399	2662	2561	2625	2654
	średni	1380	1581	1444	1514	1523
	mały	548	617	572	611	615
Zawartość CO w spalinach suchych przy $Q_{rzecz}$ [ppm]						
Oznaczenie gazu		G20	G21	G73	G155	G204
Palnik	duży	224	591	297	394	325
	średni	51	173	68	60	47
	mały	74	112	89	38	38
Obciążenia cieplne przy $P_{maxsk}$ ( $Q_{max}$ ) [W]						
Oznaczenie gazu		G20	G21	G73	G155	G204
Palnik	duży	2631	2979	2823	2914	2939
	średni	1530	1763	1640	1683	1690
	mały	593	686	636	664	664
Zawartość CO w spalinach suchych przy $Q_{max}$ [ppm]						
Oznaczenie gazu		G20*	G21**	G73	G155	G204
Palnik	duży	133	372	191	276	234
	średni	47	181	57	57	62
	mały	64	112	64	35	38

Obciążenia cieplne podano w przeliczeniu na 15°C i 1013,25 mbar.

\*Wartość graniczna w przeliczeniu na suche nierozcieńczone spaliny – 1000 ppm.

\*\*Wartość graniczna w przeliczeniu na suche nierozcieńczone spaliny – 1500 ppm.

Tablica 11. Ciśnienia badawcze, obciążenia cieplne i zawartość CO dla płyty gazowej nr 2

Ciśnienia badawcze [mbar]						
Nazwa		Ciśnienie nominalne skorygowane	Ciśnienie minimalne skorygowane	Ciśnienie maksymalne skorygowane		
Oznaczenie		$P_{nomsk}$	$P_{minsk}$	$P_{maxsk}$		
Palmik	bardzo duży	21,5	17,2	26,9		
	duży	23,0	18,4	28,8		
	średni	21,0	16,8	26,3		
	mały	22,0	17,6	27,5		
Obciążenie cieplne przy $P_{nomsk}$ ( $Q_{rzecz}$ ) [W]						
Oznaczenie gazu		G20	G21	G73	G155	G204
Palmik	bardzo duży	3440	3770	3683	3786	3787
	duży	2215	2410	2381	2445	2494
	średni	1509	1657	1579	1644	1677
	mały	843	977	945	954	957
Zawartość CO w spalinach suchych przy $Q_{rzecz}$ [ppm]						
Oznaczenie gazu		G20	G21	G73	G155	G204
Palmik	bardzo duży	957	1357	1152	1267	1347
	duży	102	337	228	294	325
	średni	19	82	26	34	48
	mały	27	135	38	52	52
Obciążenia cieplne przy $P_{maxsk}$ ( $Q_{max}$ ) [W]						
Oznaczenie gazu		G20	G21	G73	G155	G204
Palmik	bardzo duży	3801	4199	4045	4191	4211
	duży	2488	2697	2622	2714	2762
	średni	1701	1864	1791	1840	1886
	mały	978	1093	1098	1094	1101
Zawartość CO w spalinach suchych przy $Q_{max}$ [ppm]						
Oznaczenie gazu		G20*	G21**	G73	G155	G204
Palmik	bardzo duży	986	1428	1185	1235	1252
	duży	96	372	235	251	343
	średni	18	69	21	25	33
	mały	25	126	77	63	79

Obciążenia cieplne podano w przeliczeniu na 15°C i 1013,25 mbar.

\* Wartość graniczna w przeliczeniu na suche nierozcieńczone spaliny – 1000 ppm.

\*\* Wartość graniczna w przeliczeniu na suche nierozcieńczone spaliny – 1500 ppm.

Tablica 12. Ciśnienia badawcze, obciążenia cieplne i zawartość CO dla płyty gazowej nr 3

Ciśnienia badawcze [mbar]				
Nazwa		Ciśnienie nominalne skorygowane	Ciśnienie minimalne skorygowane	Ciśnienie maksymalne skorygowane
Oznaczenie		$P_{nomsk}$	$P_{minsk}$	$P_{maxsk}$
Palmik	bardzo duży	21	16,8	26,3
	średni	20	16,0	25,0
	mały	20	16,0	25,0

cd. Tablica 12.

Obciążenie cieplne przy $p_{nomsk}$ ( $Q_{rzecz}$ ) [W]						
Oznaczenie gazu		G20	G21	G73	G155	G204
Palnik	bardzo duży	3317	3617	3396	3563	3576
	średni	1720	1813	1643	1778	1772
	mały	1036	1147	1109	1092	1121
Zawartość CO w spalinach suchych przy $Q_{rzecz}$ [ppm]						
Oznaczenie gazu		G20	G21	G73	G155	G204
Palnik	bardzo duży	58	348	122	265	346
	średni	22	71	35	54	38
	mały	31	86	30	34	26
Obciążenia cieplne przy $p_{maxsk}$ ( $Q_{max}$ ) [W]						
Oznaczenie gazu		G20	G21	G73	G155	G204
Palnik	bardzo duży	3490	4082	3818	4122	4188
	średni	1910	2014	1959	2011	1976
	mały	1174	1273	1228	1287	1282
Zawartość CO w spalinach suchych przy $Q_{max}$ [ppm]						
Oznaczenie gazu		G20*	G21**	G73	G155	G204
Palnik	bardzo duży	73	408	163	265	356
	średni	17	60	26	32	22
	mały	32	78	30	29	25

Obciążenia cieplne podano w przeliczeniu na 15°C i 1013,25 mbar.

\* Wartość graniczna w przeliczeniu na suche nierozcieńczone spaliny – 1000 ppm.

\*\* Wartość graniczna w przeliczeniu na suche nierozcieńczone spaliny – 1500 ppm.

Tablica 13. Ciśnienia badawcze, obciążenia cieplne i zawartość CO dla płyty gazowej nr 4

Ciśnienia badawcze [mbar]						
Nazwa		Ciśnienie nominalne skorygowane	Ciśnienie minimalne skorygowane	Ciśnienie maksymalne skorygowane		
Oznaczenie		$p_{nomsk}$	$p_{minsk}$	$p_{maxsk}$		
Palnik	duży	23,0	18,4	28,8		
	średni	25,0	20,0	31,3		
	mały	26,5	21,2	33,1		
Obciążenie cieplne przy $p_{nomsk}$ ( $Q_{rzecz}$ ) [W]						
Oznaczenie gazu		G20	G21	G73	G155	G204
Palnik	duży	2697	2930	2865	2979	3063
	średni	1726	1893	1784	1833	1868
	mały	886	1004	957	991	1024
Zawartość CO w spalinach suchych przy $Q_{rzecz}$ [ppm]						
Oznaczenie gazu		G20	G21	G73	G155	G204
Palnik	duży	177	769	354	561	611
	średni	23	92	25	28	59
	mały	18	99	18	34	29

cd. Tablica 13.

Obciążenia cieplne przy $P_{maxsk}$ ( $Q_{max}$ ) [W]						
Oznaczenie gazu		G20	G21	G73	G155	G204
Palnik	duży	3001	3256	3175	3294	3382
	średni	1888	2146	1994	2036	2077
	mały	977	1175	1073	1086	1142
Zawartość CO w spalinach suchych przy $Q_{max}$ [ppm]						
Oznaczenie gazu		G20*	G21**	G73	G155	G204
Palnik	duży	261	1037	448	571	596
	średni	19	83	29	28	43
	mały	18	101	16	33	22

Obciążenia cieplne podano w przeliczeniu na 15°C i 1013,25 mbar.

\* Wartość graniczna w przeliczeniu na suche nierozcieńczone spaliny – 1000 ppm.

\*\* Wartość graniczna w przeliczeniu na suche nierozcieńczone spaliny – 1500 ppm.

Tablica 14. Ciśnienia badawcze, obciążenia cieplne i zawartość CO dla kuchni gazowej

Ciśnienia badawcze [mbar]						
Nazwa		Ciśnienie nominalne skorygowane	Ciśnienie minimalne skorygowane	Ciśnienie maksymalne skorygowane		
Oznaczenie		$P_{nomsk}$	$P_{minsk}$	$P_{maxsk}$		
Palnik	duży	22	17,6	27,5		
	średni	21	16,8	26,3		
	mały	22	17,6	27,5		
Obciążenie cieplne przy $P_{nomsk}$ ( $Q_{rzecz}$ ) [W]						
Oznaczenie gazu		G20	G21	G73	G155	G204
Palnik	duży	2388	2587	2489	2704	2713
	średni	1400	1512	1492	1551	1590
	mały	600	646	628	657	642
Zawartość CO w spalinach suchych przy $Q_{rzecz}$ [ppm]						
Oznaczenie gazu		G20	G21	G73	G155	G204
Palnik	duży	74	382	146	208	271
	średni	48	121	105	121	92
	mały	317	355	264	345	301
Obciążenia cieplne przy $P_{maxsk}$ ( $Q_{max}$ ) [W]						
Oznaczenie gazu		G20	G21	G73	G155	G204
Palnik	duży	2659	2884	2813	2966	3019
	średni	1571	1693	1689	1734	1778
	mały	665	721	705	754	752
Zawartość CO w spalinach suchych przy $Q_{max}$ [ppm]						
Oznaczenie gazu		G20*	G21**	G73	G155	G204
Palnik	duży	51	353	88	135	160
	średni	42	121	101	118	81
	mały	292	446	280	330	379

Obciążenia cieplne podano w przeliczeniu na 15°C i 1013,25 mbar.

\* Wartość graniczna w przeliczeniu na suche nierozcieńczone spaliny – 1000 ppm.

\*\* Wartość graniczna w przeliczeniu na suche nierozcieńczone spaliny – 1500 ppm.

### Wyniki pomiarów dla kuchni gazowej

Poszczególne pomiary wykonano z zachowaniem wymaganej niepewności pomiaru przez przywołaną normę PN-EN 30-1-1:2008 w odniesieniu do zastosowanych metod badawczych. Przyrządy pomiarowe dobrano w taki sposób, aby niepewności pomiarów poszczególnych wielkości nie przekroczyły następujących wartości:

- pomiar CO<sub>2</sub>: ± 6%,
- pomiar CO: ± 6%,
- określenie liczby Wobbe'go: ± 2%,
- pomiar strumienia gazu: ± 1%,
- pomiar ciśnienia gazu: ± 1%,
- pomiar czasu: 0,2 s.

### Wnioski

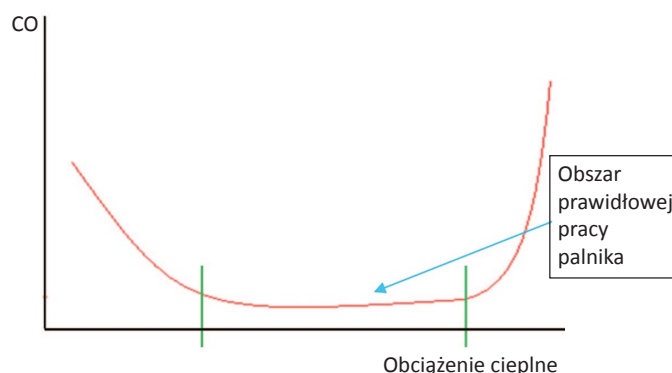
Pomiar jakości spalania palników kuchni i płyt gazowych w badaniach typu WE polega na sprawdzeniu zawartości tlenku węgla w spalinach dla gazu odniesienia (w tym przypadku był to G20) oraz gazu granicznego niepełnego spalania (w naszym przypadku był to G21) przy ciśnieniu maksymalnym. Dodatkowo pomiar zawartości CO wykonano na mieszaninach G73, G155 i G204. Wyniki tych pomiarów zostały przedstawione w tablicach 10–14 i opisano je jako *Zawartość CO w spalinach suchych przy Q<sub>max</sub>*.

Zawartość CO w spalinach mierzona była również przy takim ciśnieniu, dla którego badany palnik uzyskał obciążenie cieplne deklarowane przez producenta w warunkach pomiaru przy zasilaniu go gazem G20. Następnie palnik, bez zmieniania jego warunków pracy, zasilano pozostałymi wytypowanymi do badań gazami. Wyniki uzyskane w trakcie tych pomiarów przedstawiono w tablicach 10–14 i opisano je jako *Zawartość CO w spalinach suchych przy Q<sub>rzecz</sub>*.

Analizując zawartość tlenku węgla w spalinach w przeliczeniu na suche nierozcieńczone spaliny, można zauważyć, że w każdym z przypadków najwyższe były wartości CO uzyskane dla gazu G21. Gaz G204, który ma wyższe parametry energetyczne niż G21, odznaczał się niższą zawartością CO w spalinach. Świadczy to o tym, że nawet dłuższe płomienie, jakie powstają przy spalania gazów G155 i G204 (w porównaniu z gazem G21), nie wywołują pogorszenia spalin. Niewątpliwie związane jest to z większą szybkością spalania, jakie posiadają te gazy w porównaniu z G21, istotne znaczenie ma tutaj również konstrukcja urządzenia – decydującą rolę odgrywa wysokość rusztu nad palnikiem oraz głębokość osadzenia na płycie podpalnikowej. W badanych urządzeniach wysokość ta była na tyle duża, że nie miało to istotnego wpływu na jakość spalania. Również usytuowanie palników na płycie nie utrudniało dopływu powietrza pierwotnego oraz wtórnego. **Analizując uzyskane wyniki można stwierdzić, że negatywny wpływ konstrukcji kuchni lub płyty gazowej na jakość spalania zostałby wychwycony przy zasileniu urządzenia gazem G21.**

Bardzo interesujące są wyniki uzyskane na palniku bardzo dużym dla płyty gazowej nr 2. Widzimy tutaj, że wartości CO w spalinach niebezpiecznie zbliżają się do wartości granicz-

nych już przy ciśnieniu nominalnym (tablica 11, *Zawartość CO w spalinach suchych przy Q<sub>rzecz</sub>*), zarówno dla gazu G20 (wartość graniczna 1000 ppm), jak i dla mieszaniny G21 (wartość graniczna 1500 ppm). Działanie tego palnika jest przykładem, jak dążąc do uzyskania najwyższego obciążenia cieplnego można wejść w obszar gwałtownego wzrostu propagacji tlenku węgla w spalinach. Wynika to z faktu, że palniki kinetyczno-dyfuzyjne stosowane w kuchniach gazowych charakteryzują się ogólną zależnością jakości spalania od zakresu obciążenia cieplnego, do jakiego palnik został zaprojektowany (rysunek 4). Na jakość spalania w takich palnikach bardzo duży wpływ ma ilość zasysanego powietrza pierwotnego. Wraz ze zwiększeniem nadmiernego obciążenia cieplnego palnika, np. przez zamontowanie większej dyszy, spowoduje się zmniejszenie prędkości wypływu gazu, z jednoczesnym zwiększeniem ilości gazu, jaki palnik musi spalić. Niższa prędkość wypływu gazu wiąże się z mniejszym zassaniem powietrza pierwotnego do spalania, którego braku nie można już zrekompensować powietrzem wtórnym dostarczanym na drodze dyfuzji. W związku z tym wchodzimy w obszar gwałtownego wzrostu tworzenia tlenku węgla (rysunek 4 – na prawo od obszaru prawidłowej pracy palnika).



Rys. 4. Ogólna zależność stężenia tlenku węgla w spalinach od obciążenia cieplnego danej konstrukcji palnika kinetyczno-dyfuzyjnego

Do podobnej sytuacji dochodzi, gdy standardowy palnik (dostosowany do spalania gazu G20) zasilimy paliwem o zwiększonej kaloryczności, nie zmieniając przy tym usta-

wień samego palnika (ta sama dysza). Większe zapotrzebowanie powietrza do spalania przez gazy G21, G73, G155 i G204 powoduje, że następuje wzrost stężenia tlenu węgla w spalinach, w porównaniu z gazem odniesienia G20.

Z punktu widzenia badań typu WE istotne znaczenie mają wyniki opisane jako *Zawartość CO w spalinach suchych przy  $Q_{max}$* . Patrząc na zawartości CO w spalinach dla palnika bardzo dużego płyty nr 2, można zauważyć, że zarówno dla gazu G20, jak i dla mieszanki G21 wartości CO nie przekraczają wartości granicznych (1000 ppm dla G20 i 1500 ppm dla G21), jednak mimo to zbliżają się one do granicy tego poziomu. Natomiast zawartości CO w spalinach powstałych ze spalania pozostałych gazów, czyli G73, G155 i G204, mieszczą się w przedziale pomiędzy zawartością CO dla gazu G20 a zawartością CO dla G21.

Podobnie sytuacja przedstawia się dla pozostałych badanych urządzeń. Dla gazu G20 notowano minimalną zawar-

tość CO na większości badanych palników, natomiast przy spalaniu mieszanki G21 zawsze rejestrowano maksymalną koncentrację CO.

Opisany powyżej przypadek bardzo dużego palnika płyty gazowej nr 2 pokazuje, że nie można bezkarnie podwyższać mocy palnika, a producenci, mając na uwadze bezpieczną eksploatację urządzenia, powinni pamiętać o tym, iż parametry energetyczne gazu dostarczanego odbiorcom mogą zmieniać się w dość szerokich granicach w obrębie jednej grupy, szczególnie dotyczy to gazu ziemnego wysokometanowego.

Opierając się na uzyskanych wynikach, można stwierdzić, że gaz G21 jest odpowiedni jako gaz graniczny niepełnego spalania (przy badaniach typu WE według normy PN-EN 30-1-1 urządzeń przystosowanych do spalania gazu rodziny drugiej grupy 2E), mimo że w najbliższej przyszłości, wobec importu gazu LNG, jego skład może ulegać znacznym zmianom.

Prosimy cytować jako: Nafta-Gaz 2013, nr 8, s. 599–612

Artykuł powstał na podstawie pracy pt.: *Ocena gazu granicznego G21 pod kątem jego przydatności dla gazów ziemnych wysokometanowych pochodzących z regazyfikacji LNG* – praca INiG na zlecenie MNiSW; nr archiwalny: DK-4100-26/12, nr zlecenia: 26/GU/12.

## Literatura

- [1] Dane własne. INiG Kraków.
- [2] Electric Power Research Institute: *Fuel Composition Impacts on Combustion Turbine Operability*. Technical Update, March 2006.
- [3] Kaliski M. i in.: *Wykorzystanie gazu ziemnego w gospodarstwach domowych w Polsce*. Nafta-Gaz 2011, nr 2, s. 125–134.
- [4] Matyasik I., Słoczyński T.: *Niekonwencjonalne złoża gazu – shale gas*. Nafta-Gaz 2010, nr 3, s. 167–177.
- [5] PN-EN 30-1-1:2008 *Domowe urządzenia gazowe do gotowania i pieczenia – Część 1-1: Bezpieczeństwo – Postanowienia ogólne*.
- [6] *Spalanie i paliwa*. Skrypt pod redakcją W. Kordylewskiego. Wydanie IV. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 2005.



Mgr inż. Robert WOJTOWICZ  
Kierownik techniczny Laboratorium Badań Urządzeń Gazowniczych i Grzewczych.  
Instytut Nafty i Gazu  
ul. Lubicz 25A  
31-503 Kraków  
E-mail: [wojtowicz@inig.pl](mailto:wojtowicz@inig.pl)