

Wpływ dodatku wodoru do sieci gazowej projektowanie instalacji gazowej w budynku mieszkalnym

Effect of hydrogen addition to the gas network on the design of the gas system in a residential building

Andrzej Jedlikowski, Sebastian Englart, Maciej Skrzycki*

Słowa kluczowe: urządzenia gazowe, paliwo gazowe, budynki wielorodzinne

Streszczenie

W artykule przeanalizowano wpływ udziału wodoru w gazociągu gazu wysokometanowego (grupy E), na projektowanie instalacji gazowej w budynku. Zwrócono szczególną uwagę na podejmowane działania, dotyczące dopuszczalnych wartości dodawanego wodoru. Scharakteryzowano właściwości fizykochemiczne mieszaniny gazu ziemnego z wodorem, prowadzące do określenia odpowiedniej metodologii obliczeniowej. Przeprowadzono obliczenia strat ciśnienia w instalacji gazu ziemnego oraz jego mieszaniny z wodorem. Potwierdzono, że udział 20% wodoru nie wpływa znacząco na funkcjonowanie instalacji gazowej w budynku. Wykazano występowanie przekroczenia wartości wybranych wielkości fizycznych, prowadzącego do konieczności wymiany gazomierzy i reduktorów ciśnienia gazu.

Keywords: gas appliances, gas fuel, multi-family buildings

Abstract

The paper analyzes the impact of the proportion of hydrogen in the high-methane gas (group E) pipeline on the design of a building's gas system. Particular attention was paid to the measures taken regarding the permissible values of added hydrogen. The physical and chemical properties of the natural gas-hydrogen mixture were characterized, leading to the determination of an appropriate calculation methodology. Pressure loss calculations were carried out for natural gas and its mixture with hydrogen. It was confirmed that the 20% share of hydrogen does not significantly affect the operation of the building's gas system. The occurrence of exceedances of selected physical quantities leading to the necessity of replacing gas meters and gas pressure regulators was demonstrated.

1. WSTĘP

Polskie gazociągi, od pewnego czasu, stanowią bardzo poważne wyzwanie dla zastosowań wodoru. Istnieje powszechne przekonanie, że wodór może być doskonałą alternatywą dla gazu ziemnego. Wielu producentów i dystrybutorów urządzeń gazowych informuje o gotowości wdrożenia technologii wodorowych H2 Ready [7, 11, 17, 27, 34]. Wynika to z kluczowego elementu transformacji energetycznej, jakim jest dekarbonizacja. Jej główne zadania obejmują zamianę wykorzystywanych do ogrzewania paliw stałych – paliwami pozbawionymi emisji lub ich zastępowania niskoemisyjnymi źródłami energii. Kolejne kwestie dotyczą zastępowania gazu wykorzystywanego do potrzeb grzewczych innymi gazami, które podczas spalania nie emitują dwutlenku węgla [7, 17, 34]. Wodór doskonale spełnia powyższe wymogi, gdyż spala się czysto, reagując z tlenem w powietrzu i przekształcając się w wodę. Ponadto znakomicie wpisuje się w założenia strategii w zakresie wodoru na rzecz Europy neutralnej dla klimatu oraz Polskiej Strategii Wodorowej do roku 2030 z perspektywą do 2040 r. Główną grupę urządzeń grzewczych,

przystosowanych do spalania wodoru, stanowią gazowe kotły kondensacyjne. Ich zasada działania polega nie tylko na uzyskiwaniu energii ze spalania gazu, lecz pozyskiwania jej również z pary wodnej, zgromadzonej w spalinach. Tego typu urządzenia charakteryzują się także płynnym działaniem, wynikającym z zastosowania palnika o modulowanej mocy. Takie urządzenie dostosowuje wówczas swoją moc do aktualnego zapotrzebowania na ciepło. Obecnie producenci informują o możliwościach zasilania kotłów gazowych mieszanką wodorową sięgającą 20% [7, 17, 34]. W przyszłości mają także na uwadze wprowadzenie na rynek urządzeń gazowych, spalających czysty wodór. Do tego celu wymagane jest jednak przygotowanie odpowiednich przepisów i regulacji prawnych. Zgodnie z opinią przedstawioną przez ekspertów firmy Bosch [27] legislacja wodorowa powinna być gotowa do 2025 roku. Umożliwi to wówczas przeprowadzanie testów eksploatacji kotłów, z wykorzystaniem mieszanin metanu oraz wodoru. Ponadto szacuje się, że około 2030 r. wodór będzie dostępny w gazociągach, co pozwoli na weryfikację funkcjonowania kotłów zasilanych wyłącznie tym nośnikiem energii.

* **Andrzej Jedlikowski** (autor korespondencyjny) – Politechnika Wrocławska, Wydział Inżynierii Środowiska, Katedra Klimatyzacji, Ogrzewnictwa, Gazownictwa i Ochrony Powietrza, ul. Norwida 4/6, 50-373 Wrocław, e-mail: andrzej.jedlikowski@pwr.edu.pl, ORCID: 0000-0002-2456-253X

Sebastian Englart – Politechnika Wrocławska, Wydział Inżynierii Środowiska, Katedra Klimatyzacji, Ogrzewnictwa, Gazownictwa i Ochrony Powietrza, ul. Norwida 4/6, 50-373 Wrocław, ORCID: 0000-0002-5407-4617

Maciej Skrzycki – Politechnika Wrocławska, Wydział Inżynierii Środowiska, Katedra Klimatyzacji, Ogrzewnictwa, Gazownictwa i Ochrony Powietrza, ul. Norwida 4/6, 50-373 Wrocław, ORCID: 0000-0002-8098-0795

Przy stosowaniu wodoru należy w szczególności brać pod uwagę koszty i sposoby jego wytwarzania. W zależności od pozyskania wodoru, można wyodrębnić dziewięć kolorystycznych grup: szarą, niebieską, czarną i brązową, turkusową, zieloną, różową oraz żółtą i białą. Najważniejsze obecnie źródło wodoru przyporządkowane jest do barwy szarej – produkowanej w procesie reformingu parowego węglowodorów [30].

Jak można zauważyć, powyższe informacje obejmują wyłącznie urządzenia przeznaczone dla potrzeb grzewczych. Zazwyczaj uwaga skierowana jest głównie na kotły gazowe. Niestety nadal brakuje danych i wyników badań dotyczących eksploatacji pozostałych urządzeń gazowych. Obecne na rynku kotły gazowe nie są przystosowane do spalania 100% wodoru. Modyfikacja urządzenia gazowego do jego działania na mieszaninie gazu ziemnego z wodorem nie jest zbyt skomplikowana, a więc może być zrealizowana przez autoryzowanego serwisanta [29]. W istniejących budynkach natomiast dość powszechnie eksploatowane są także kuchnie, kuchenki lub płyty gazowe. Jak dotąd brak informacji dotyczących ich działania z dodatkiem wodoru. Podobna kwestia dotyczy także gazowych podgrzewaczy przepływowych. Jest to o tyle istotne, że wiele gospodarstw domowych może być wyposażonych w każde ze wspomnianych urządzeń. To bardzo poważny problem, gdyż jeśli zastosowanie wodoru w tych urządzeniach nadal nie będzie brane pod uwagę, wówczas może być konieczne zastąpienie ich rozwiązaniami elektrycznymi.

Warto uszczegółwić informacje dotyczące parametrów oraz dostępności wyżej wspomnianych kotłów. Niemiecki producent systemów grzewczych, przemysłowych i chłodniczych Viessmann informuje, iż po zakończeniu badań prototypu kotła H2 Ready, urządzenia zostaną poddane testom kwalifikacyjnym i wytrzymałościowym. Kolejnym etapem powinna być dystrybucja wodoru w sieciach gazowych, przeznaczonych do gospodarstw domowych i zakładów przemysłowych [35]. Dotychczas tylko francuskie przedsiębiorstwo przemysłowe De Dietrich [8] zdecydowało się na zamieszczenie danych, odnoszących się do oferowanych kotłów gazowych. Inni dystrybutorzy urządzeń, jak np. Ariston, podają ogólne informacje na temat swoich produktów. Podobnie te kwestie wyglądają również w dokumentacjach zamieszczanych na stronach internetowych o zasięgu międzynarodowym.

Na tej podstawie można zaobserwować, że w typowych zastosowaniach domowych (ogrzewanie pomieszczeń oraz przygotowanie ciepłej wody użytkowej) wiszące kotły gazowe charakteryzują się mocą 20; 24 oraz 28 kW. Z tego względu należy potwierdzić, że takie urządzenia mogą być montowane w budynkach jednorodzinnych lub lokalach mieszkalnych budynków wielorodzinnych. Oprócz tego przedstawione wartości są takie same jak w przypadku klasycznych lub kondensacyjnych kotłów jedno i dwufunkcyjnych. Problem tkwi w tym, że zaproponowane urządzenia są wyłącznie jednofunkcyjne. Innymi słowy, zastąpienie istniejącego kotła dwufunkcyjnego, eksploatowanego w układzie przepływowym, podobnym urządzeniem przystosowanym do spalania wodoru, może wymagać zastosowania dodatkowego podgrzewacza pojemnościowego. Taki kocioł przygotowuje ciepłą wodę użytkową w układzie akumulacyjnym. Jak dotąd nie zaobserwowano w ofertach producentów dostępności kotłów dwufunkcyjnych, przystosowanych do spalania wodoru, a więc być może takie usprawnienie nie będzie dotyczyło również podgrzewaczy przepływowych. W tym miejscu nasuwa się wiele istotnych pytań. Dlaczego rozwijanie technologii wodorowej łączy się nie tylko z koniecznością wymiany urządzeń, lecz również zapewnienia dla nowszych rozwiązań dodatkowego miejsca? Czy możliwa jest bezpieczna eksploatacja urządzeń gazowych nieobjętych technologią H2 Ready? Jaki jest wpływ istniejącej instalacji gazowej w budynku na poprawność działania urządzeń zasilanych mieszkanką metanu z wodorem? Aby zrozumieć powyższe problemy, należy najpierw dokonać przeglądu literatury.

2. Przegląd aktualnego stanu wiedzy

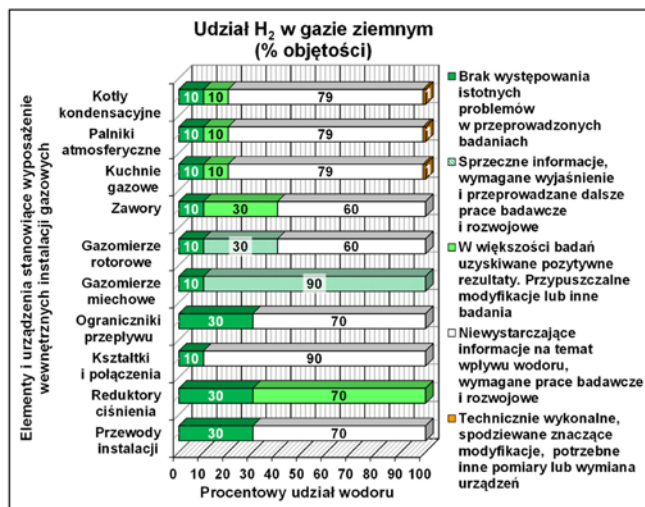
W literaturze przedmiotu istnieje wiele prac poświęconych tematyce wodorowej. Jaworski i in. [18] przeanalizowali wpływ dodawanego wodoru do gazu ziemnego na elementy systemu gazowniczego. Autorzy odnieśli się do wyraźnych różnic fizykochemicznych wodoru, w porównaniu do typowych składników gazu ziemnego (metan, etan, propan, butan, azot itp.). Zwrócili przy tym szczególną uwagę na ustalenie odpowiedniej granicy stężenia wodoru, umożliwiającej zapewnienie bezpiecznej eksploatacji odbiorników gazowych (kuchenek, przepływowych podgrzewaczy wody, kotłów oraz promienników). Ponadto przedstawili wyniki przeprowadzonych badań dotyczących wpływu: dodatku 10; 15 oraz 23% wodoru, zarówno na urządzenia gazowe przeznaczone do użytku domowego lub komercyjnego, jak i na gazomierze miechowe oraz reduktory średniego ciśnienia. Autorzy ustalili, między innymi, że bezpieczne i efektywne spalanie gazu w urządzeniach końcowych dopuszcza wprowadzenie 15% dodatku wodoru. Natomiast bezpieczeństwo przeciwybuchowe urządzeń, stosowanych w strefie zagrożenia wybuchem, umożliwiło zapewnienie maksymalnie 8% dodatku wodoru. Ponadto, przy długotrwałej eksploatacji urządzeń gazowych zasilanych mieszaniną gazu ziemnego z wodorem, ważne jest utrzymywanie na wysokim poziomie parametrów ich działania oraz bezpieczeństwa technicznego [18]. W pracach autorstwa Zabrzskiego i in. [36] oraz Kippersa i in. [20] stwierdzono, że dodatek około 20% wodoru w gazie ziemnym, nie ma znaczącego wpływu na charakterystykę spalania, a nawet powoduje czystsze spalanie tego paliwa. Według Haeseldonckx'a i in. [15] mieszaniny gazowe zawierające do 17% objętości wodoru nie powinny powodować trudności eksploatacyjnych. Szoplík i Ciuksza [32] podjęły próbę przeprowadzenia symulacji zróżnicowanych mieszanin gazu wysokometanowego i wodoru (z dodatkiem H₂ – 15; 30%) oraz wtłoczenia czystego wodoru do gazociągów niskiego ciśnienia. Autorki zaobserwowały również, że dodatek paliw gazowych, takich jak wodór, o wyraźnie odmiennych właściwościach fizykochemicznych do typowego składu gazu ziemnego, wpływa w istotny sposób na warunki eksploatacji sieci gazowej oraz dostawę gazu do odbiorców. Ze względu na obniżone w ten sposób ciepło spalania, wymagane jest więc zwiększenie strumienia przepływu transportowanej mieszaniny gazowej, przy znacznie wyższym naciśnieniu na wejściu do sieci gazowej. Skutkiem tego może być również przekroczenie maksymalnego naciśnienia dopuszczalnego, dotyczącego gazociągów niskiego ciśnienia. Podobną tematyką, lecz tym razem w odniesieniu do osiedlowej sieci gazowej, zajmowali się Englart i Jedlikowski [13]. Autorzy potwierdzili istotne zmiany składu fizykochemicznego mieszaniny gazu wysokometanowego oraz wodoru, na eksploatację pierścieniowej sieci gazowej niskiego ciśnienia. W analizach przeprowadzili symulację funkcjonowania gazociągu jedno i dwupierścieniowego. Wykazali możliwości zatłaczania wodoru, sięgającego 55% w wariacie dwupierścieniowym oraz 49% w jednopierścieniowym. W obliczeniach wykorzystano zarówno oprogramowanie autorskie, jak i komercyjne. Istnieje także opracowanie Szewczyka i Jaworskiego [31], obejmujące wpływ dodatku wodoru na szczelność elementów sieci i instalacji gazowych. Autorzy zwrócili uwagę na zdecydowanie niższą gęstość wodoru w porównaniu do gazu ziemnego, co przekłada się również na utrzymanie wysokiej szczelności połączeń elementów sieci i instalacji. Przeanalizowali w tym celu zastosowanie różnych metod oraz materiałów uszczelniających. Zgodnie z przeprowadzonymi badaniami wykazano, że 15% udział wodoru nie spowodował występowania nieszczelności na łączonych elementach. Dodatkowo stwierdzono, że następstwem nieszczelności może być znacznie szybsze wydostawanie się mieszaniny gazu ziemnego z wodorem, co spowoduje szybsze osiągnięcie dolnej granicy wybuchowości. W kolejnej pracy prowadzonej przez Jaworskiego i in. [19] zrealizowano badania wpływu dodawanego do sieci gazowej wodoru na trwałość gazomierzy miechowych. Autorzy sprawdzili parametry eksploatacyj-

ne gazomierzy, z uwzględnieniem dodatku wodoru (5; 10; 15%) do gazu ziemnego wysokometanowego, charakterystycznego dla polskich sieci dystrybucyjnych. Pomimo zmian stężenia wodoru w mieszaninie gazowej, nie stwierdzono występowania istotnych różnic błędów wskazań urządzeń. Ponadto nie zaobserwowano wpływu zatłoczonego wodoru na pogorszenie ich trwałości.

W pracy autorstwa Holey-Wataj i Kukulskiej-Zajac [16] zwrócono uwagę na zmienność liczby metanowej gazu ziemnego, na skutek dodawania wodoru. Wykazano, że minimalna wartość tej liczby powinna przekraczać 65, podczas gdy jej optymalna wartość powinna wynosić powyżej 80. Przeanalizowano w tym celu 19 różnych składów gazu ziemnego, należącego do grupy E, charakterystycznego dla polskiej sieci dystrybucyjnej. Autorki określiły maksymalny spadek liczby metanowej, który stanowił 22,1% w odniesieniu do wartości wyjściowej analizowanego gazu ziemnego. W żadnym z rozpatrywanych wariantów liczba metanowa nie osiągnęła wartości niższych niż 65, aczkolwiek stwierdzono również, że w niektórych przypadkach obecność 5% wodoru może spowodować spadek liczby optymalnej poniżej 80. W efekcie prowadzi to do pogorszenia właściwości stukowych paliwa, szczególnie istotnych dla pracy silników spalinowych.

Chaczykowski i Osiadacz [6] dokonali przeglądu struktury rynku gazowego, obejmującego nowoczesne technologie dotyczące zarządzania sieciami gazowymi, z uwzględnieniem zróżnicowanej jakości gazu. Opisano między innymi przykłady instalacji zatłaczania wodoru do systemów gazowniczych. Zwrócono uwagę na dobór parametrów poszczególnych stacji dozowania wodoru, który powinien zapewniać stabilizację parametrów mieszaniny gazowej we wszystkich węzłach gazociągu oraz równowagę między produkcją i zużyciem.

W innej pracy Chaczykowski [4] również dokonał przeglądu dotyczącego zatłaczania wodoru do sieci gazowych oraz jego wpływu na urządzenia gazowe. Autor omówił dostępne w literaturze wyniki badań wpływu wodoru na wrażliwość elementów systemu gazowniczego. W pracy autorstwa Blesznowskiego i in. [3] przedstawiono natomiast kierunki rozwoju gospodarki wodorowej w Polsce. Opisano szereg



Rys. 1. Wrażliwość wybranych elementów instalacji gazowych na zawartość wodoru w gazie ziemnym, opracowana na podstawie wyników zawartych w publikacji Marcogaz [23]

Fig. 1. The sensitivity of selected gas system components to the hydrogen content in natural gas, developed from the results in the Marcogaz publication [23]

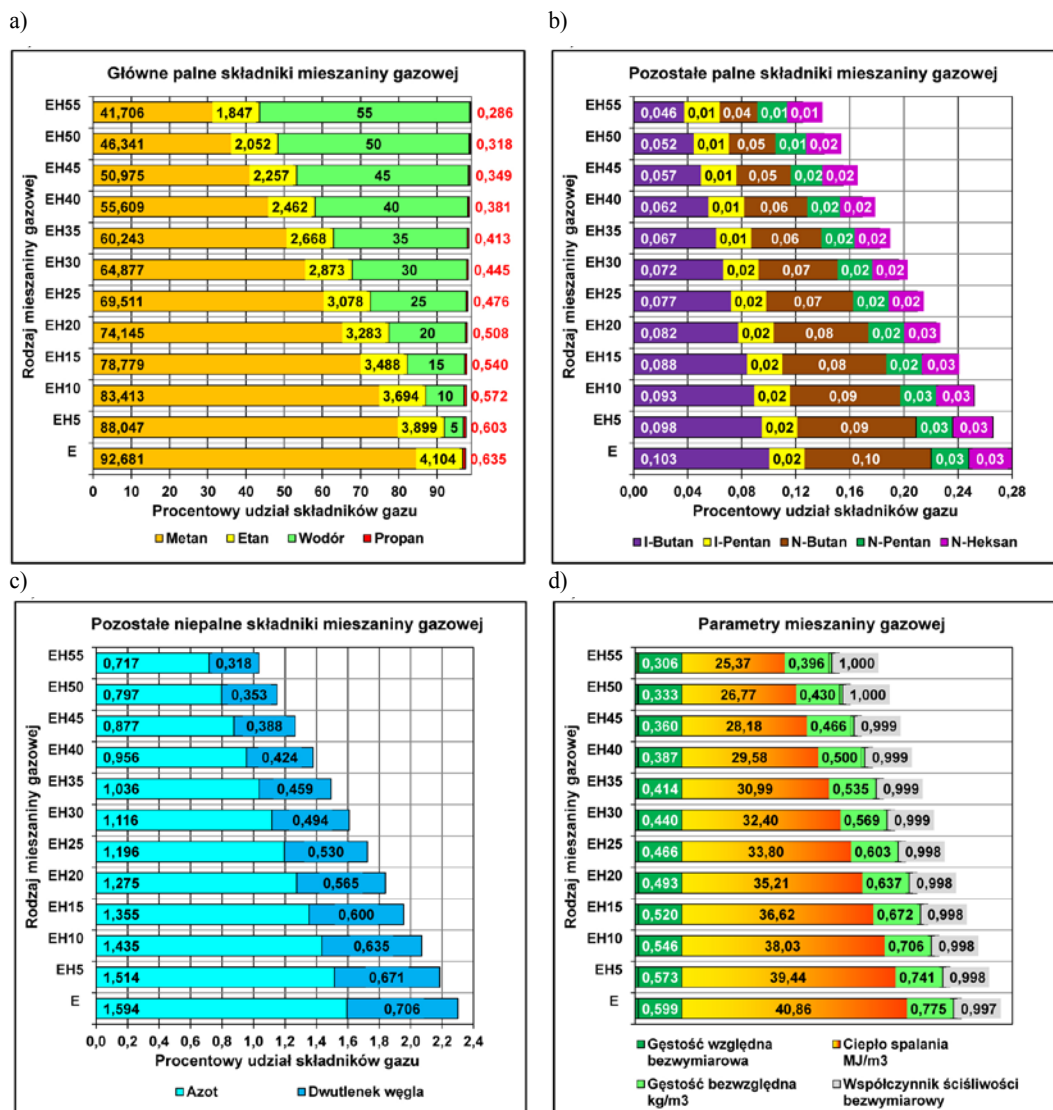
zagadnień dotyczących wodoru oraz technologii wodorowych. Ponadto scharakteryzowano metody i koszty magazynowania, transportu oraz dystrybucji tego surowca.

W podobny sposób Chaczykowski [5] opisał rolę gazownictwa w transformacji energetycznej w Polsce. Wykazał możliwości pozyskiwania niskoemisyjnych substytutów gazu ziemnego, takich jak biogaz fermentacyjny, biosyntetyczny gaz ziemny pochodzący ze zgazowania biomasy oraz wodór. W odniesieniu do ostatniego surowca autor wyodrębnił różne metody jego produkcji. Przywołał także zestawienie ograniczeń udziału wodoru w mieszaninie z gazem ziemnym w elementach infrastruktury gazowej, zawarte w publikacji Marcogaz [23]. Warto

Tabela 1. Zakres zmienności procentowego udziału wodoru w systemach gazowniczych gazu ziemnego opracowany na podstawie danych udostępnionych przez Marcogaz [23]

Table 1. Range of variation in the percentage of hydrogen in natural gas systems compiled from data provided by Marcogaz [23]

Elementy i urządzenia stanowiące wyposażenie wewnętrznych instalacji gazowych w przeprowadzonych badaniach	Udział wodoru w gazie ziemnym (objętość procentowa)				
	Brak istotnych problemów	Sprzeczne informacje, wymagane wyjaśnienie i dalsze prace badawcze i rozwojowe	W większości badań uzyskiwane pozytywne rezultaty. Przepuszczone modyfikacje lub inne badania	Niewystarczające informacje na temat wpływu wodoru, wymagane prace badawcze i rozwojowe	Technicznie wykonalne, spodziewane znaczące modyfikacje potrzebne inne badania lub wymiana urządzeń
Przewody w instalacjach gazowych	0-30			30-100	
Reduktory ciśnienia			30-100		
Kształtki i armatura	0-10			10-100	
Ograniczniki przepływu	0-30			30-100	
Gazomierze miechowe		10-100			
Gazomierze rotorowe		10-40		40-100	
Zawory	0-10		10-40		
Kuchnie gazowe					
Palniki atmosferyczne			10-20	20-99	99-100
Kotły kondensacyjne					



Rys. 2. Skład gazu oraz wybrane parametry mieszaniny ziemnego gazu wysokometanowego z wodorem wyznaczone przy ciśnieniu 1013 hPa i temperaturze 0°C: E – gaz wysokometanowy, EHx – mieszanina gazu wysokometanowego z wodorem; (x – procent dodanego wodoru): a) główne palne składniki mieszaniny gazowej, b) pozostałe palne składniki mieszaniny gazowej, c) pozostałe niepalne składniki mieszaniny gazowej, d) parametry mieszaniny gazowej

Fig. 2. Gas composition and selected parameters of the mixture of high-methane natural gas with hydrogen determined at a pressure of 1013 hPa and a temperature of 0°C: E – high-methane gas, EHx – mixture of high-methane gas with hydrogen; (x – percentage of added hydrogen): (a) the main combustible components of the gas mixture, (b) the other combustible components of the gas mixture, (c) the other noncombustible components of the gas mixture, (d) the parameters of the gas mixture

zaznaczyć, że Marcogaz to ponad 50-letnia unijna organizacja gazowa, która zrzesza czołowych operatorów systemu przesyłania i dystrybucji paliw gazowych oraz krajowe stowarzyszenia przemysłu gazu w Europie [12]. Opracowane na jej podstawie informacje zawierają także ocenę wpływu dodatku wodoru do gazu ziemnego [23]. Wrażliwość wybranych elementów instalacji gazowych na zawartość wodoru w gazie ziemnym, ustaloną na podstawie danych opublikowanych przez Marcogaz [23], przedstawiono na rys. 1. W celu precyzyjnej identyfikacji wartości procentowych, zakres zmienności udziału wodoru w systemach gazowniczych gazu ziemnego zestawiono również w tab. 1.

W przypadku urządzeń stosowanych w gospodarstwach domowych, takich jak np. kuchnia gazowa i kocioł kondensacyjny, przy 10% dodatku wodoru, stwierdzono brak występowania istotnych problemów zawartych w dostępnych badaniach. Wartość 20% uzasadniono uzyskiwaniem w większości pozytywnych rezultatów badań, aczkolwiek zaznaczono przypuszczalną konieczność modyfikacji lub potrzebę przeprowadzenia innych pomiarów. Podczas gdy wyższe stężenia wodoru, sięgające niekiedy 99%, określono jako informacje niewystarczające, wymagające dalszych badań. Na szczególną uwagę zasługuje jednak ocena zastosowania w kuchence gazowej i kotle kondensacyjnym czystego wodoru w stężeniu 100%. W wyniku oceny wpisano, że jest to technicznie wykonalne, lecz wymaga znaczących modyfikacji, przeprowadzenia innych pomiarów lub wymiany urządzeń. W porównaniu do klasycznych kotłów, około 95% elementów ich budowy, przy dostosowaniu do spalania wodoru pozostaje bez zmian, a różnica obejmuje głównie konstrukcje palników oraz komór spalania.

Na podstawie przeglądu literatury potwierdzono, że nadal brakuje wielu istotnych informacji dotyczących dopuszczalnych stężeń wodoru w instalacjach gazowych. Ustanowienie ram, służących osiągnięciu neutralności klimatycznej w Unii Europejskiej do 2050 r. [28], spowodowało rozpoczęcie prac zmierzających do ograniczenia emisji netto gazów cieplarnianych do 2030 r. o co najmniej 55% (w porównaniu do poziomów z 1990 r.). Doprowadziło to, w głównej mierze, do propagowania rozwiązań grzewczych, sprzyjających zastosowaniu technologii wodorowej H2 Ready. Dotychczas objęto tą procedurą wyłącznie nowoczesne gazowe kotły jednofunkcyjne. Dopuszczalne stężenie wodoru, dodawanego do systemu dystrybucji gazu, ustalono na poziomie 20%. Jak podają niektóre źródła, taka wartość powinna zredukować roczną emisję gazów cieplarnianych o 7% [34]. Niestety nadal brak informacji obejmujących pozostałe, powszechnie eksploatowane urządzenia, takie jak np. kotły dwufunkcyjne, podgrzewacze przepływowe oraz kuchnie gazowe. Dostępne w literaturze przedmiotu prace naukowe informują w podobny sposób o możliwościach bezpiecznej eksploatacji niektórych urządzeń, przy 10; 15 lub 20% udziale wodoru. Analogicznie, brak precyzyjnych informacji dotyczących kaloryczności mieszaniny gazu wysokometanowego z wodorem. Przypuszczalnie z tego powodu producenci i dystrybutorzy urządzeń gazowych, w przypadku układów przepływowych (podgrzewacze wody), nie podejmują się zagadnień związanych z wodorem. Okazuje się bowiem, że ich poprawne działanie wymaga zwiększenia dostawy strumienia gazu do odbiorców końcowych. Kolejne kwestie dotyczą również kuchni gazowych, dla których wpływ wodoru może wydłużyć czas przygotowania posiłków. Wciąż brakuje

także wytycznych, dotyczących projektowania lub dostosowania istniejącej instalacji gazowej w budynku, do eksploatacji z mieszaniną gazu ziemnego z wodorem.

Powyższe problemy skłoniły autorów niniejszej pracy do przeanalizowania procesu projektowania typowej instalacji gazowej w wielorodzinnym budynku mieszkalnym. Przed charakterystyką objętej opracowaniem instalacji gazowej, należy najpierw przeanalizować parametry fizykochemiczne zastosowanej mieszaniny wysokometanowego gazu z wodorem.

3. Opis metodologii

Właściwości fizykochemiczne mieszaniny gazu ziemnego z wodorem (EHx) zależą od jej składu procentowego. Dodatek procentowy wodoru skutkuje odpowiednią redukcją pozostałych składników gazu (jak pokazano na rys. 2). Przedstawione parametry różnych mieszanin gazu ziemnego z wodorem, wyznaczono za pomocą procedury obliczania właściwości termodynamicznych, bazujących na zastosowaniu równania stanu dla gazu ziemnego i innych mieszanin [21, 22].

Jak można zauważyć, stopniowe zwiększanie stężenia wodoru, powoduje zmniejszenie gęstości oraz ciepła spalania mieszaniny gazowej. Dodatek wodoru wpływa zatem na spadek kaloryczności powstałej mieszaniny gazu ziemnego, w odniesieniu do objętości. Ze względu na wymóg dostarczania do odbiorców identycznego strumienia energii chemicznej zawartej w paliwie, niezbędna jest więc kompensacja zmniejszonej kaloryczności, poprzez zwiększenie strumienia gazu kierowanego do odbiorców (urządzeń gazowych).

Skorygowaną wartość natężenia przepływu gazu można wyznaczyć następująco:

$$V_{nom(EHX)} = V_{nom(E)} \cdot k; \text{ m}^3/\text{s}, \quad (1)$$

gdzie:

k – współczynnik korygujący wzrost zapotrzebowania na gaz ze względu na zróżnicowane wartości ciepła spalania gazu wysokometanowego grupy E oraz mieszaniny tego gazu z wodorem, $k = H_{s(E)} / H_{s(EHX)}$, bezwymiarowy,

$H_{s(E)}$ – ciepło spalania gazu E, MJ/m³,

$H_{s(EHX)}$ – ciepło spalania mieszaniny gazu metanowego z wodorem (x – procent dodanego wodoru), MJ/m³,

$V_{nom(E)}$ – nominalne zużycie gazu E przez urządzenie gazowe, m³/s.

Podobnie zmiana ciśnienia gazu przed urządzeniem gazowym, może zrekompensować spadek kaloryczności, ze względu na następującą zależność [33]:

$$V_{nom} = a \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_{nom}}{\rho_{(p)}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{d}}; \text{ m}^3/\text{s} \quad (2)$$

gdzie:

a – powierzchnia inżektora, m²,

d – gęstość względna gazu, bezwymiarowa,

Δp_{nom} – ciśnienie gazu przed urządzeniem gazowym, Pa,

$\rho_{(p)}$ – gęstość powietrza, kg/m³.

Uwzględniając równanie (2), można wyznaczyć wymagane ciśnienie gazu przed urządzeniem gazowym zasilanym mieszaniną gazu i wodoru z następującej formuły:

$$\Delta p_{nom(EHX)} = \Delta p_{nom(E)} \frac{\rho_{(EHx)} \cdot V_{nom(EHX)}^2}{\rho_{(E)} \cdot V_{nom(E)}^2}; \text{ Pa} \quad (3)$$

gdzie:

$V_{nom(E)}$ – nominalne zużycie gazu E przez urządzenie gazowe, m³/s,

$V_{nom(EHX)}$ – nominalne zużycie mieszaniny gazu ziemnego z wodorem EHx (x – procent dodanego wodoru) przez urządzenie gazowe, m³/s,

Δp_{nom} – ciśnienie gazu, Pa,

$\rho_{(E)}$ – gęstość gazu ziemnego E, kg/m³,

$\rho_{(EHx)}$ – gęstość mieszaniny gazu ziemnego z wodorem EHx (x – procent dodanego wodoru), kg/m³.

Dalsze kwestie wymagają odpowiedniego przykładu obliczeniowego. Do tego celu wybrano wielorodzinnny 3-kondygnacyjny budynek mieszkalny, podłączony do sieci gazowej średniego ciśnienia, w której operator zapewnił dostawę gazu wysokometanowego grupy E. W budynku znajduje się 18 mieszkań, wyposażonych w jednakowe urządzenia przeznaczone do przygotowania posiłków oraz realizujące potrzeby komunalno-bytowe (centralne ogrzewanie i przygotowanie ciepłej wody użytkowej).

Dobrano następujące indywidualne urządzenia gazowe, zamontowane w każdym lokalu mieszkalnym:

- kuchnia o sumarycznej mocy / zużyciu gazu przez palniki gazowe 7,8 kW / 0,74 m³/h,
- kocioł dwufunkcyjny o maksymalnej mocy / zużyciu gazu 24 kW / 2,61 m³/h.

W celu rozliczenia ilości zużywanego gazu w komunikacji ogólnodostępnej na każdej kondygnacji budynku zastosowano gazomierze G4, dla których nominalny strumień przepływu wyznaczony dla powietrza o gęstości 1,2 kg/m³, wynosi 4 m³/h, a maksymalny 6 m³/h.

Aby określić wartości strumieni minimalnych i maksymalnych gazomierza dla gazu ziemnego, można skorzystać z dostępnych w literaturze zależności [10].

Dołą granicę obciążeń pomiarowych można obliczyć za pomocą wzoru (4):

$$V_{min(E)} = V_{min(P)} \frac{\mu_{(P)}}{\mu_{(E)}}; \text{ m}^3/\text{h} \quad (4)$$

gdzie:

$V_{min(P)}$ – minimalne obciążenie dla powietrza, m³/h,

$\mu_{(E)}$ – współczynnik lepkości dynamicznej gazu ziemnego E, Pa·s,

$\mu_{(P)}$ – współczynnik lepkości dynamicznej powietrza, Pa·s.

Natomiast górną granicę obciążeń pomiarowych wyznacza się na podstawie formuły (5):

$$V_{max(E)} = V_{max(P)} \sqrt{\rho_{(P)} / \rho_{(E)}}; \text{ m}^3/\text{h} \quad (5)$$

gdzie:

$V_{max(P)}$ – maksymalne obciążenie dla powietrza, m³/h,

$\rho_{(E)}$ – gęstość gazu ziemnego E, kg/m³,

$\rho_{(P)}$ – gęstość powietrza, kg/m³.

Przyjmując w zależności (5) gęstość powietrza równą 1,2 kg/m³, a gazu wysokometanowego 0,775 kg/m³ można zauważyć, że nominalne natężenie przepływu gazu przez gazomierz miechowy G4 wyniesie ok. 5,0 m³/h a maksymalne ok. 7,5 m³/h.

Kolejny etap obliczeń stanowi wyznaczenie strumienia przepływu gazu do poszczególnych odbiorców w budynku. Założono dostawę paliwa gazowego z pojedynczego przyłącza dla całego budynku. W obiekcie zainstalowano sumarycznie 18 kuchni i 18 kotłów gazowych dwufunkcyjnych.

W celu obliczenia godzinowego zapotrzebowania na gaz w rozpatrywanym budynku wykorzystano zależność dostępną w literaturze [1, 2]:

$$V_{obl} = n_{kg} \cdot V_{kg} \cdot f_{kg} + n_{kdf} \cdot V_{kdf} \cdot f_{kdf}; \text{ m}^3/\text{h} \quad (6)$$

gdzie:

f_{kdf} – współczynnik jednoczesności działania kotłów dwufunkcyjnych, bezwymiarowy,

f_{kg} – współczynnik jednoczesności działania kuchni gazowych, bezwymiarowy,

n_{kdf} – liczba kotłów dwufunkcyjnych, szt.,

n_{kg} – liczba kuchni gazowych, szt.,

V_{kdf} – nominalne godzinowe zużycie gazu przez jeden kocioł dwufunkcyjny, m³/h,

V_{kg} – nominalne godzinowe zużycie gazu przez jedną kuchnię gazową, m³/h.

Współczynniki jednoczesności działania urządzeń w budynku obliczono za pomocą dwóch opublikowanych we wcześniejszych pracach autorskich formuł empirycznych [13, 14]:

$$f_{kg} = \frac{0,591}{n_{kg}^{0,5}} + 0,03 \quad (7)$$

$$f_{kdf} = \frac{0,858}{n_{kdf}^{0,628}} + 0,139 \quad (8)$$

gdzie:

n_{kdf} – liczba kotłów dwufunkcyjnych, szt.,

n_{kg} – liczba kuchni gazowych, szt.

W celu uzupełnienia danych dotyczących obliczeń hydraulicznych, określono średni współczynnik jednoczesności za pomocą średniej ważonej współczynników rozpatrywanych rodzajów urządzeń:

$$f_{kg+kdf} = \frac{V_{obl}}{V_{nom}} = \frac{V_{kg} \cdot n_{kg} \cdot f_{kg} + V_{kdf} \cdot n_{kdf} \cdot f_{kdf}}{V_{kg} \cdot n_{kg} + V_{kdf} \cdot n_{kdf}} \quad (9)$$

gdzie:

V_{nom} – nominalne godzinowe zużycie gazu przez urządzenie lub sumę urządzeń, m³/h,

V_{obl} – obliczeniowe godzinowe zużycie gazu przez urządzenie lub sumę urządzeń z uwzględnieniem współczynników jednoczesności działania, m³/h.

Pozostałe wielkości fizyczne zostały wyznaczone zgodnie z procedurą zawartą w literaturze przedmiotu [1, 2]. Instalację gazową w budynku zaprojektowano z rur stalowych przewodowych bez szwu dla mediów palnych [26]. Długość odcinka L_{odc} oznacza długość geometryczną każdej działki obliczeniowej. Długość zastępczą L_{zas} przyjmowano poprzez wykorzystanie przybliżonych długości przewodów równoważnych współczynnikom oporu miejscowego elementów instalacji gazowej (kolana, trójniki, zawory itp.). Do tego celu przygotowano następujące wartości (tab. 2) [2, 9]:

Kolejne zmienne dotyczą: prędkości obliczeniowej (w_{obl}), odcinkowych strat ciśnienia (Δp_o), różnicy wysokości geometrycznej (h_g) powodującej występowanie dodatkowej straty lub odzysku ciśnienia gazu (Δp_h). Finalne obliczenia hydrauliczne zamyka całkowita strata ciśnienia gazu danej działki obliczeniowej (Δp_c).

Prędkość gazu można obliczyć za pomocą formuły [1]:

$$w_{obl} = 353,86 \frac{V_{obl}}{d_w^2}; \quad \text{m/s} \quad (10)$$

gdzie:

d_w – średnica wewnętrzna przewodu, mm,

V_{obl} – obliczeniowe godzinowe zużycie gazu przez urządzenie lub sumę urządzeń z uwzględnieniem współczynników jednoczesności działania, m³/h.

W celu wyznaczenia odcinkowej straty ciśnienia skorzystano z formuły zaproponowanej przez Renouarda, a następnie zmodyfikowanej przez Osiadacza [2]:

$$\Delta p_{o(E)} = \frac{0,776457 \cdot 10^{-8} \cdot \rho_{(E)} (L_{odc} + L_{zas}) V_{obl(E)}^{1,82}}{d_w^{4,82}}; \quad \text{Pa} \quad (11)$$

$$\Delta p_{o(EHx)} = \frac{0,776457 \cdot 10^{-8} \cdot \rho_{(EHx)} (L_{odc} + L_{zas}) V_{obl(EHx)}^{1,82}}{d_w^{4,82}}; \quad \text{Pa} \quad (12)$$

gdzie:

d_w – średnica wewnętrzna przewodu, m,

L_{odc} – długość działki obliczeniowej przewodu, m,

L_{zas} – długość zastępcza przewodu, m,

$\rho_{(E)}$ – gęstość gazu ziemnego E, kg/m³,

$\rho_{(EHx)}$ – gęstość mieszaniny gazu ziemnego z wodorem EHx (x – procent dodanego wodoru), kg/m³,

V_{obl} – obliczeniowe godzinowe zużycie gazu przez urządzenie lub sumę urządzeń z uwzględnieniem współczynników jednoczesności działania; indeksy dolne: (E) – dotyczy wysokometanowego gazu ziemnego, natomiast (EHx) – oznacza mieszaninę gazu ziemnego z wodorem, m³/h.

Stratę lub odzysk ciśnienia gazu spowodowany jego przepływem w odcinku pionowym można wyznaczyć następująco [1]:

$$\Delta p_{h(E)} = g \cdot h (\rho_{(P)} - \rho_{(E)}); \quad \text{Pa} \quad (13)$$

$$\Delta p_{h(EHx)} = g \cdot h (\rho_{(P)} - \rho_{(EHx)}); \quad \text{Pa} \quad (14)$$

gdzie:

g – przyspieszenie ziemskie, m/s²,

h – różnica wysokości w danej działce obliczeniowej; ujemna gdy gaz przepływa w górę, a dodatnia gdy przepływa w dół, m,

$\rho_{(E)}$ – gęstość gazu ziemnego E, kg/m³,

$\rho_{(EHx)}$ – gęstość mieszaniny gazu ziemnego z wodorem EHx (x – procent dodanego wodoru), kg/m³,

$\rho_{(P)}$ – gęstość powietrza, kg/m³.

Całkowita strata ciśnienia gazu stanowi sumę straty odcinkowej oraz straty lub odzysku ciśnienia gazu spowodowanych różnicą wysokości:

$$\Delta p_c = \Delta p_o + \Delta p_h; \quad \text{Pa} \quad (15)$$

gdzie:

Δp_h – strata lub odzysk ciśnienia gazu spowodowane różnicą wysokości, Pa,

Δp_o – odcinkowa strata ciśnienia gazu, Pa.

Tabela 2. Przybliżone długości przewodów równoważne współczynnikom oporu miejscowego wyrażane w metrach [2, 9]

Table 2. Approximate pipe lengths equivalent to local resistance coefficients expressed in meters [2, 9]

Średnica nominalna / ISO / calowa	DN10	DN15	DN20	DN25	DN32	DN40	DN50	DN65	DN80
	17,2 ¾"	21,3 ½"	26,9 ¾"	33,7 1"	42,4 1 ¼"	48,3 1 ½"	60,3 2"	76,1 2 ½"	88,9 3"
Rodzaj oporu miejscowego									
Zawór kulowy	0,10	0,15	0,30	0,30	0,30	0,40	0,50	0,60	0,90
Zawór kątowy	0,30	0,40	0,70	0,70	0,80	1,10	1,70	2,10	3,00
Kolano	0,40	0,55	1,30	1,30	1,50	1,80	1,90	2,10	2,90
Redukcja	0,10	0,10	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,50	0,70
Trójnik przelotowy	0,10	0,15	0,40	0,40	0,50	0,70	1,00	1,30	1,80
Trójnik odgałęzienie	0,25	0,40	0,90	1,10	1,40	1,90	2,70	3,20	4,50

Obliczenia uznawane są za zakończone, jeśli suma całkowitych strat ciśnienia na drodze od najniekorzystniej usytuowanego urządzenia gazowego do kurka głównego (szafki gazowej) nie przekracza wartości dopuszczalnej, która dla instalacji budynkowej zasilanej z przyłącza średniego ciśnienia gazem ziemnym grupy E wynosi 200 Pa [2].

4. Wyniki obliczeń

Obliczenia przeprowadzono dla budynkowej instalacji gazowej wykonanej zgodnie ze schematem (rys. 3). Dostawa paliwa gazowego odbywa się za pomocą jednego przyłącza gazu doprowadzonego do szafki gazowej. W szafce zlokalizowano kurek główny DN40, dwa reduktory ciśnienia gazu MR10F/A, o sumarycznym natężeniu przepływu gazu wynoszącym 20 m³/h oraz zawór odcinający DN40.

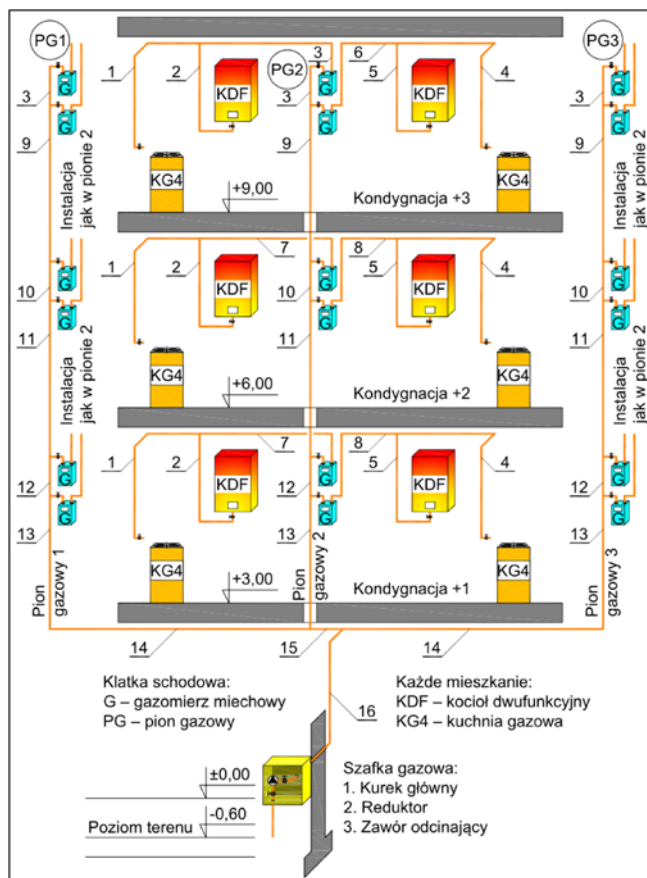
Instalację gazową rozprowadzono do trzech pionów gazowych, znajdujących się na klatkach schodowych – PG1, PG2 oraz PG3. Szczegółowo przedstawiono instalację wraz z urządzeniami pionu PG2. Pozostałe piony wykonano analogicznie. Każdy pion obsługuje sześć lokali mieszkalnych, co umożliwia łączne zasilanie 18 zestawów urządzeń, składających się z kuchni gazowej i kotła dwufunkcyjnego.

Obliczenia przeprowadzono dla dwóch przypadków z zastosowaniem:

- gazu wysokometanowego grupy E (tab. 3 i 4),
- omieszaniny gazu wysokometanowego grupy E oraz 20% dodatku wodoru (tab. 5 i 6).

Oprócz tego wyznaczono straty ciśnienia gazu do najniekorzystniej usytuowanego urządzenia gazowego w taki sposób, aby nie przekroczyć maksymalnej wartości dopuszczalnego ciśnienia w instalacji gazowej.

Na podstawie otrzymanych wyników można zauważyć, że najniekorzystniej usytuowanym urządzeniem, w rozpatrywanej instalacji gazowej, jest kocioł dwufunkcyjny, gdyż strata ciśnienia przy przepływie gazu grupy E na drodze od pionu gazowego, usytuowanego na klatce schodowej do tego urządzenia, wynosi 14,3 Pa (tab. 3). Wartość ta, jest zdecydowanie wyższa, niż podobnie wyznaczona strata ciśnienia do kuchni gazowej (4,8 Pa). Precyzyjna lokalizacja urządzenia, odnośnie do pionu i kondygnacji, wymaga zestawienia



Rys. 3. Schemat obliczeniowy instalacji gazowej

Fig. 3. Calculation diagram of the gas system

sumy strat ciśnienia na drodze od każdego kotła do kurka głównego (tab. 4). Analizując otrzymane wyniki, potwierdzono, że najniekorzystniej usytuowane urządzenie zlokalizowane jest z prawej strony pionu PG1 na kondygnacji +3.

Tabela 3. Zestawienie strat ciśnienia w budynkowej instalacji gazowej zasilanej gazem wysokometanowym grupy E

Table 3. Summary of pressure losses in a building gas system supplied with group E high-methane gas

Nr dz.	Urządzenie gazowe	n_{urz}	V_{nom}	f	V_{obl}	L_{odc}	L_{zas}	d_z	g	d_w	w_{obl}	Δp_o	h_g	Δp_h	Δp_c
-	-	szt.	m ³ /h	-	m ³ /h	m	m	mm	mm	mm	m/s	Pa	m	Pa	Pa
1	KG4	1	0,74	0,621	0,46	3,0	1,9	21,3	2,6	16,1	0,63	3,2	1,60	8,1	4,8
2	KDF	1	2,61	1,000	2,61	2,0	1,6	26,9	2,6	21,7	1,96	13,0	1,35	6,9	14,3
3	KG4+KDF	2	3,35	0,916	3,07	5,5	4,6	26,9	2,6	21,7	2,31	48,9	-1,05	-5,3	47,8
4	KG4	1	0,74	0,621	0,46	3,0	1,9	21,3	2,6	16,1	0,63	3,2	1,60	8,1	4,8
5	KDF	1	2,61	1,000	2,61	2,0	1,6	26,9	2,6	21,7	1,96	13,0	1,35	6,9	14,3
6	KG4+KDF	2	3,35	0,916	3,07	5,0	5,9	26,9	2,6	21,7	2,31	52,7	-1,05	-5,3	51,7
7	KG4+KDF	2	3,35	0,916	3,07	5,5	3,3	26,9	2,6	21,7	2,31	42,6	-0,55	-2,8	42,0
8	KG4+KDF	2	3,35	0,916	3,07	5,0	4,7	26,9	2,6	21,7	2,31	46,9	-1,05	-5,3	45,9
9	KG4+KDF	4	6,71	0,640	4,29	2,4	0,4	33,7	3,2	27,3	2,04	8,2	-2,40	-12,2	5,8
10	KG4+KDF	6	10,06	0,525	5,29	0,6	0,4	33,7	3,2	27,3	2,51	4,3	-0,60	-3,0	3,7
11	KG4+KDF	8	13,41	0,460	6,17	2,4	0,4	33,7	3,2	27,3	2,93	15,9	-2,40	-12,2	13,5
12	KG4+KDF	10	16,77	0,416	6,98	0,6	0,4	33,7	3,2	27,3	3,32	7,1	-0,60	-3,0	6,5
13	KG4+KDF	12	20,12	0,385	7,75	2,0	0,6	33,7	3,2	27,3	3,68	22,0	-2,00	-10,2	20,0
14	KG4+KDF	12	20,12	0,385	7,75	10,0	1,5	42,4	3,2	36,0	2,12	26,1	0,00	0,0	26,1
15	KG4+KDF	24	40,24	0,293	11,79	0,5	0,8	42,4	3,2	36,0	3,22	6,3	0,00	0,0	6,3
16	KG4+KDF	36	60,35	0,254	15,36	2,5	8,1	48,3	3,2	41,9	3,10	40,2	-2,50	-12,7	37,7

Tabela 4. Zestawienie sumy strat ciśnienia na drodze od najniekorzystniej usytuowanego urządzenia gazowego do kurka głównego (szafki gazowej) – gaz wysokometanowy grupy E

Table 4. Summary of total pressure losses along the path from the most unfavorably located gas appliance to the gas main valve (gas cabinet) – group E high-methane gas

Numery działek	Suma strat ciśnienia	Numery działek	Suma strat ciśnienia	Numery działek	Suma strat ciśnienia
–	Pa	–	Pa	–	Pa
Pion gazowy 1	Pion gazowy 2	Pion gazowy 3			
K+3: 2, 3, 9–16	181,9	K+3: 2, 3, 9–13, 15, 16	155,8	K+3: 2, 3, 9–14, 16	175,5
K+3: 5, 6, 9–16	185,8	K+3: 5, 6, 9–13, 15, 16	159,6	K+3: 5, 6, 9–14, 16	179,4
K+2: 2, 7, 10–16	170,3	K+2: 2, 7, 10–13, 15, 16	144,1	K+2: 2, 7, 10–14, 16	163,9
K+2: 5, 8, 11–16	170,4	K+2: 5, 8, 11–13, 15, 16	144,3	K+2: 5, 8, 11–14, 16	164,1
K+1: 2, 7, 12–16	153,0	K+1: 2, 7, 12–13, 15, 16	126,9	K+1: 2, 7, 12–14, 16	146,7
K+1: 5, 8, 13–16	150,4	K+1: 5, 8, 13, 15, 16	124,2	K+1: 5, 8, 13–14, 16	144,0

Następnie przeprowadzono obliczenia strat ciśnienia dla tej samej instalacji, lecz z uwzględnieniem 20% dodatku wodoru w sieci gazowej. W celu skompensowania zredukowanej kaloryczności (ze względu na proporcjonalnie obniżony udział procentowy poszczególnych składników gazu ziemnego grupy E, kosztem

dotowanego wodoru) wymagane jest podwyższenie strumienia dostarczanej mieszanki gazowej (tab. 5). Konsekwencją tych działań jest również wzrost sumy strat ciśnienia, która finalnie przekroczyła wartość dopuszczalną dla analizowanego przypadku (200 Pa; tab. 6).

Tabela 5. Zestawienie strat ciśnienia w budynkowej instalacji gazowej zasilanej gazem wysokometanowym grupy E z 20% dodatkiem wodoru

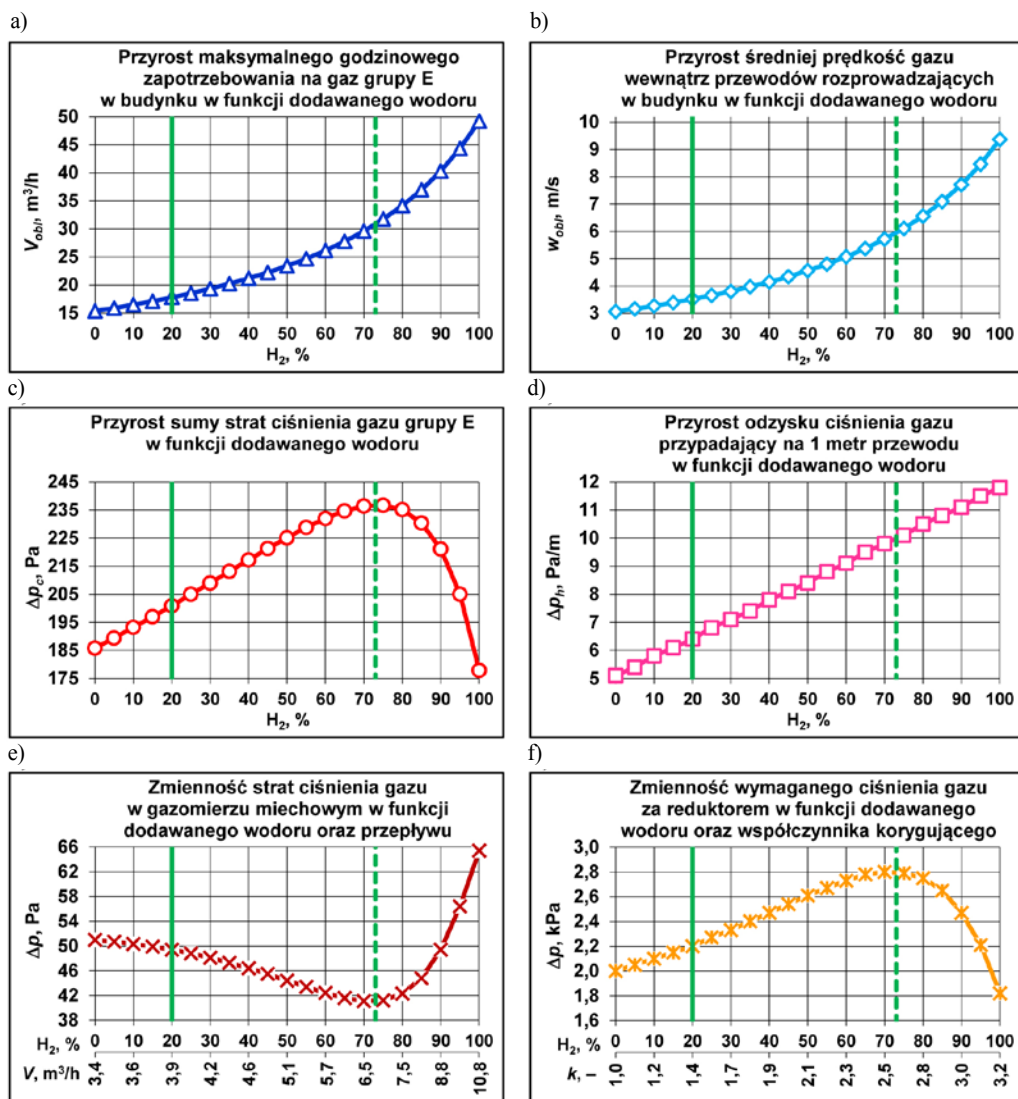
Table 5. Summary of pressure losses in the building gas system supplied with group E high-methane gas with a 20% hydrogen addition

Nr dz.	Urządzenie gazowe	n_{ur}	V_{nom}	f	V_{obl}	L_{odc}	L_{zas}	d_z	g	d_w	w_{obl}	Δp_o	h_g	Δp_h	Δp_c
–	–	szt.	m ³ /h	–	m ³ /h	m	m	mm	mm	mm	m/s	Pa	m	Pa	Pa
1	KG4	1	0,86	0,621	0,54	3,0	1,9	21,3	2,6	16,1	0,73	3,4	1,60	10,3	5,0
2	KDF	1	3,03	1,000	3,03	2,0	1,6	26,9	2,6	21,7	2,27	14,0	1,35	8,7	15,3
3	KG4+KDF	2	3,89	0,916	3,56	5,5	4,6	26,9	2,6	21,7	2,68	52,6	-1,05	-6,7	51,6
4	KG4	1	0,86	0,621	0,54	3,0	1,9	21,3	2,6	16,1	0,73	3,4	1,60	10,3	5,0
5	KDF	1	3,03	1,000	3,03	2,0	1,6	26,9	2,6	21,7	2,27	14,0	1,35	8,7	15,3
6	KG4+KDF	2	3,89	0,916	3,56	5,0	5,9	26,9	2,6	21,7	2,68	56,8	-1,05	-6,7	55,8
7	KG4+KDF	2	3,89	0,916	3,56	5,5	3,3	26,9	2,6	21,7	2,68	45,9	-0,55	-3,5	45,3
8	KG4+KDF	2	3,89	0,916	3,56	5,0	4,7	26,9	2,6	21,7	2,68	50,6	-1,05	-6,7	49,5
9	KG4+KDF	4	7,78	0,640	4,97	2,4	0,4	33,7	3,2	27,3	2,36	8,9	-2,40	-15,4	6,5
10	KG4+KDF	6	11,66	0,525	6,13	0,6	0,4	33,7	3,2	27,3	2,91	4,6	-0,60	-3,9	4,0
11	KG4+KDF	8	15,55	0,460	7,15	2,4	0,4	33,7	3,2	27,3	3,40	17,2	-2,40	-15,4	14,8
12	KG4+KDF	10	19,44	0,416	8,10	0,6	0,4	33,7	3,2	27,3	3,84	7,7	-0,60	-3,9	7,1
13	KG4+KDF	12	23,33	0,385	8,98	2,0	0,6	33,7	3,2	27,3	4,27	23,7	-2,00	-12,9	21,7
14	KG4+KDF	12	23,33	0,385	8,98	10,0	1,5	42,4	3,2	36,0	2,45	28,1	0,00	0,0	28,1
15	KG4+KDF	24	46,66	0,293	13,67	0,5	0,8	42,4	3,2	36,0	3,73	6,8	0,00	0,0	6,8
16	KG4+KDF	36	69,98	0,254	17,81	2,5	8,1	48,3	3,2	41,9	3,59	43,4	-2,50	-16,1	40,9

Tabela 6. Zestawienie sumy strat ciśnienia na drodze od najniekorzystniej usytuowanego urządzenia gazowego do kurka głównego (szafki gazowej) – gaz wysokometanowy grupy E z 20% dodatkiem wodoru

Table 6. Summary of total pressure losses along the path from the most unfavorably located gas appliance to the gas main valve (gas cabinet) – group E high-methane gas with a 20% hydrogen addition

Numery działek	Suma strat ciśnienia	Numery działek	Suma strat ciśnienia	Numery działek	Suma strat ciśnienia
–	Pa	–	Pa	–	Pa
Pion gazowy 1	Pion gazowy 2	Pion gazowy 3			
K+3: 2, 3, 9–16	196,8	K+3: 2, 3, 9–13, 15, 16	168,6	K+3: 2, 3, 9–14, 16	189,9
K+3: 5, 6, 9–16	200,9	K+3: 5, 6, 9–13, 15, 16	172,8	K+3: 5, 6, 9–14, 16	194,1
K+2: 2, 7, 10–16	184,0	K+2: 2, 7, 10–13, 15, 16	155,9	K+2: 2, 7, 10–14, 16	177,2
K+2: 5, 8, 11–16	184,2	K+2: 5, 8, 11–13, 15, 16	156,1	K+2: 5, 8, 11–14, 16	177,4
K+1: 2, 7, 12–16	165,2	K+1: 2, 7, 12–13, 15, 16	137,1	K+1: 2, 7, 12–14, 16	158,4
K+1: 5, 8, 13–16	162,3	K+1: 5, 8, 13, 15, 16	134,2	K+1: 5, 8, 13–14, 16	155,5



Rys. 4. Wpływ procentowego udziału wodoru na zmiany parametrów projektowych instalacji gazowej w budynku: a) sumarycznego zapotrzebowania na gaz budynku, b) średniej prędkości przepływu w przewodach rozprowadzających, c) strat ciśnienia do najniekorzystniej usytuowanego urządzenia, d) odzysku ciśnienia gazu, e) strat ciśnienia w gazomierzu, f) wymagane ciśnienie gazu za reduktorem

Otrzymane wyniki obliczeń stały się inspiracją dla autorów niniejszej pracy do sporządzenia wykresów wpływu udziału wodoru w szerokim zakresie na zmienność wybranych parametrów projektowych, obejmujących instalację gazową w budynku (rys. 4). W tym celu najpierw zestawiono przyrosty godzinowego zapotrzebowania na gaz oraz prędkości przepływu gazu w przewodach rozprowadzających z wyłączeniem fragmentów instalacji prowadzonej w lokalach mieszkalnych (rys. 4a i b).

Następnie przedstawiono przebieg sumy strat ciśnienia gazu, która w porównaniu do wartości dopuszczalnej (wynoszącej dla analizowanego przypadku 200 Pa) decyduje o właściwym zaprojektowaniu instalacji wewnętrznej gazu (rys. 4c). Ponadto zwrócono także uwagę na zmiany korzystnego efektu odzysku ciśnienia gazu występującego podczas przepływu gazu w przewodach pionowych do wyższych kondygnacji (rys. 4d).

Finałnie dokonano również zestawienia zmian strat ciśnienia na gazomierzu obsługującym każdy lokal mieszkalny (rys. 4e) oraz zmienności wymaganego ciśnienia za układem reduktora zlokalizowanym w szafce gazowej na elewacji budynku (rys. 4f). Osie odciętych tych wykresów uzupełniono także natężeniem przepływu gazu oraz współczynnikiem korygującym zużycie gazu odpowiadającym procentowym udziałem dodawanego wodoru.

5. Dyskusja wyników

Przedstawione w poprzednim rozdziale wykresy pozwoliły na zwrócenie uwagi na wiele istotnych kwestii projektowych. Ze względu na utrzymywanie właściwej kaloryczności mieszaniny gazu ziemnego i wodoru, konieczne jest podwyższenie strumienia przepływu paliwa

gazowego dostarczanego do odbiorców. Konsekwencją tego jest więc wzrost prędkości przepływu gazu oraz strat ciśnienia w instalacji (por. tab. 3 i 5). Wpływ 20% dodatku wodoru do sieci gazowej może przyczynić się zatem do wzrostu sumy strat ciśnienia, przekraczającej niekiedy wartość dopuszczalną wynoszącą 200 Pa (por. tab. 4 i 6). Taka sytuacja zazwyczaj występuje, gdy na etapie projektowym nie przewidziano odpowiedniej rezerwy, pozwalającej na wzrost maksymalnej wartości strat ciśnienia. Podobne komplikacje mogą dotyczyć także dobranych gazomierzy i reduktorów ciśnienia gazu.

W rozpatrywanej instalacji gazowej budynku przekroczenie sumy strat ciśnienia (200,9 Pa) nie powinno mieć jednak znaczącego wpływu na jej funkcjonowanie. Ponadto nie zaobserwowano również przekroczenia maksymalnej prędkości przepływu gazu, której wartość osiągnęła 4,3 m/s. Zgodnie z literaturą przedmiotu prędkość przepływu gazu w instalacji gazowej powinna wynosić do 6 m/s [1, 2]. W pełni skuteczne pozostaną także zastosowane gazomierze miechowe typu G4, dla których odnotowano zmianę przepływu gazu z 3,35 m³/h do 3,89 m³/h. Podobna obserwacja dotyczy również reduktorów ciśnienia, przy których stwierdzono nieznaczny wzrost przepływu gazu z 15,36 m³/h do 17,81 m³/h.

Dalsze zwiększanie udziału wodoru (powyżej 20%) może przyczynić się jednak do występowania wielu szczególnych nieprawidłowości. Wśród nich można wymienić wzrost maksymalnego godzinowego zapotrzebowania na gaz do wartości blisko 50 m³/h (rys. 4 a), co 2,5-krotnie przekracza przepływ nominalny reduktora. Średnia prędkość przepływu gazu w przewodach rozdzielczych również przewyższa dopuszczalną wartość, sięgając prawie 10 m/s (rys. 4b). Podobnie wzrasta maksymalna wartość sumy strat ciśnienia gazu w instalacji od 185 Pa do 235 Pa, aczkolwiek

wzrost ten występuje wyłącznie do momentu osiągnięcia udziału wodoru w gazie ziemnym sięgającym 73% (rys. 4c). Warto starannie przeanalizować tę wartość w odniesieniu do pozostałych wykresów. Powyżej tej granicy można bowiem zaobserwować gwałtowny spadek maksymalnej sumy strat ciśnienia do blisko 178 Pa. Powodem tego są występujące: sukcesywne obniżanie strat ciśnienia oraz zwiększony stopień odzysku ciśnienia gazu w przewodach pionowych (rys. 4d). Poza tym, na szczególną uwagę zasługuje łagodny spadek straty ciśnienia w gazomierzu typu G4, który po przekroczeniu 73% udziału wodoru zaczyna znacząco wzrastać (rys. 4e). Jak można zauważyć, przepływ gazu w tym urządzeniu pomiarowym wyraźnie przekracza maksymalną dopuszczalną wartość 6 m³/h, w rezultacie uzyskując 10,8 m³/h. Podobne problemy dotyczą także reduktora (rys. 4f), lecz w tym przypadku zauważalny jest wzrost wymaganego ciśnienia gazu od 2 kPa (nastawy fabrycznej) do 2,8 kPa. Wynik ten wprawdzie nie przekracza dopuszczonych przepisami wartości 5 kPa [24], aczkolwiek nie spełnia wymagań normy, dotyczącej paliw gazowych, według której ciśnienie przed urządzeniami gazowymi dla gazu grupy E powinno być w zakresie 1,6–2,5 kPa [2, 25]. Natomiast powyżej 73% udziału wodoru odnotowano istotny spadek ciśnienia za reduktorem do 1,8 kPa. Podsumowując, warto podkreślić, że powyższe uwagi dotyczą urządzeń funkcjonujących poza zakresem ich dopuszczalnego przepływu gazu, co w konsekwencji może wiązać się z koniecznością ich wymiany. Nadal jednak pozostają nierozwiązane kwestie dotyczące uzyskiwania wyraźnie podwyższonych wartości parametrów projektowych, obejmujących instalację gazową w budynku.

6. Wnioski

- Na podstawie przeprowadzonych prac wyciągnięto następujące wnioski:
- występowanie wodoru w sieci gazowej wymaga zwiększenia natężenia przepływu gazu, w celu utrzymania odpowiedniej kaloryczności otrzymanej mieszaniny gazowej,
 - wyższe natężenie przepływu gazu każdorazowo powoduje wzrost jego prędkości w wewnętrznej instalacji budynku, co może prowadzić do przekroczenia wartości dopuszczalnej (6 m/s),
 - udział 20% dodatku wodoru w sieci gazowej nie wpływa znacząco na funkcjonowanie instalacji gazowej w budynku,
 - dopuszczalna w literaturze przedmiotu suma strat ciśnienia gazu dla analizowanego przypadku (200 Pa), wyznaczona od najmniejkorzystnej usytuowanego urządzenia gazowego do kurka głównego zlokalizowanego w szafce gazowej, przy wprowadzeniu wodoru, może osiągnąć nawet 250 Pa,
 - dodatek wodoru istotnie podwyższa możliwości odzyskiwanego ciśnienia gazu w przewodach pionowych, które obsługują urządzenia zlokalizowane na wyższych kondygnacjach budynku,
 - obecność ekstremum dotyczącego zmienności wybranych parametrów projektowych instalacji gazowej stwierdzono przy 73% udziale wodoru,
 - w rozpatrywanym przypadku instalacji gazowej, przekroczenie 30% udziału wodoru wymaga podjęcia działań zmierzających do wymiany gazomierzy oraz reduktorów ciśnienia, gdyż osiągnięte zostały zakresy ich nominalnego przepływu,
 - nadal brak jednoznacznych wytycznych, obejmujących dopuszczalne zakresy zmian parametrów projektowych, dotyczących instalacji gazowych w budynkach. ■

LITERATURA

- Andrzejczak E., Flis A., Kielbasiński M., Więcaszek M., Barczyński A. 2006. Miedź w instalacjach gazowych. Wydanie trzecie. Polskie Centrum Promocji Miedzi. Wrocław.
- Bąkowski K. 2007. „Sieci i instalacje gazowe”. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa.
- Blesznowski M., Lazor M., Razumkova K., Skrzypkiewicz M., Motyliński K., Wierzbicki M., Boguszewicz P., Kupecki J. 2022. „Kierunki rozwoju gospodarki wodorowej w Polsce”. Gaz, Woda i Technika Sanitarna (9): 19–29.
- Chaczykowski M. 2022. „Przegląd prac badawczych dotyczących procesu zatlaczania wodoru do istniejących systemów gazowniczych”. Gaz, Woda i Technika Sanitarna (1): 7–12.
- Chaczykowski M. 2022. „Rola gazownictwa w transformacji energetycznej w Polsce”. Gaz, Woda i Technika Sanitarna (9): 8–16.
- Chaczykowski M., Osiadacz A.J. 2023. „Zarządzanie zróżnicowaniem jakości gazu w systemach gazowniczych”. Gaz, Woda i Technika Sanitarna (2): 2–8.
- De Dietrich Blog. 2023. Kotły gazowe H2 Ready – co warto wiedzieć o ogrzewaniu wodorem? <https://dedietrich.pl/blog/kotly-gazowe-h2-ready-co-warto-wiedziec-o-ogrzewaniu-wodorem/> (dostęp: 11.10.2023).
- De Dietrich. 2023. Inidens wiszący gazowy kocioł kondensacyjny. Źródło: <https://dedietrich.pl/inidens/> (dostęp: 12.10.2023).
- Demark. Średnice rur wg typoszeregów. Stal nierdzewna kwasoodporna. Źródło: <https://www.demark.net.pl/pl/informator-techniczny/srednice-rur-wg-typoszeregow> (dostęp: 17.10.2023).
- Dopke J. Gazomierze miechowe. Dobór do odbiorcy gazu. Apator Metrix S.A., s. 1–16. Źródło: <https://wentylacja.com.pl/att/article/Dopke199-SystemyOgrzewania-Gazomierze-Czesc-2-563.pdf> (dostęp: 14.10.2023).
- Ecieplo.pl, Viessmann. 2022. Jak obniżyć rachunki za gaz? Nowoczesne kotły gazowe H2 Ready. Źródło: <https://ecieplo.pl/gorne-zrodlo-odbiorniki-ciepła/ogrzewanie-i-chłodzenie/jak-obniżyć-rachunki-za-gaz-nowoczesne-kotly-gazowe-h2-ready/> (dostęp: 11.10.2023).
- Energetyka 24. 2023. PSG podczas jubileuszu Marcogaz. Źródło: <https://energetyka24.com/gaz/wiadomosci/psg-podczas-jubileuszu-marcogaz> (dostęp: 13.10.2023).
- Englart S., Jedlikowski A. 2023. „Wpływ dodatku wodoru na eksploatację osiedlowej sieci gazowej”. Instal (7–8): 14–23.
- Englart S., Skrzycki M. 2016. „Przegląd metod obliczeniowych do wyznaczania zapotrzebowania na gaz”. Gaz, Woda i Technika Sanitarna (1): 2–7.
- Haeseldonckx D., D'haeseleer W., 2007. “The use of the natural-gas pipeline infrastructure for hydrogen transport in a changing market structure”. International Journal of Hydrogen Energy vol. 32 (10–11): 1381–1386.
- Holewa-Rataj J., Kukulka-Zajac E. 2020. „Wpływ dodatku wodoru na liczbę metanową gazu ziemnego”. Nafta-Gaz (12): 945–950.
- Immergas. 2023. Kotły H2 ready, czyli ogrzewanie wodorem – co warto wiedzieć? Źródło: <https://www.immergas.pl/blog/kotly-h2-ready-czyli-ogrzewanie-wodorem-co-warto-wiedziec/b2c/> (dostęp: 11.10.2023).
- Jaworski J., Kukulka-Zajac E., Kulaga P. 2019. „Wybrane zagadnienia dotyczące wpływu dodatku wodoru do gazu ziemnego na elementy systemu gazowniczego”. Nafta-Gaz (10): 625–632.
- Jaworski J., Kulaga P., Blacharski T. 2020. “Study of the Effect of Addition of Hydrogen to Natural Gas on Diaphragm Gas Meters”. Energies 13 (3066): 1–20.
- Kippers M.J., De Laat J.C., Hermkens R.J.M. 2011. „Pilot Project on Hydrogen Injection in Natural Gas on Island of Ameland in the Netherlands”. In Proceedings of the International Gas Research Conference, Seoul, Korea, 19–21 October 2011: 1–22.
- Kunz O., Klimeck R., Wagner W., Jaeschke M. 2007. „The GERG-2004 Wide-Range Equation of State for Natural Gases and Other Mixtures”. GERG Technical Monograph 15. Fortschr.-Ber. VDI, Reihe 6, Nr. 557, VDI Verlag, Düsseldorf.
- Kunz O., Wagner W. 2012. “The GERG-2008 Wide-Range Equation of State for Natural Gases and Other Mixtures: An Expansion of GERG-2004”, Journal of Chemical & Engineering Data. 57 (11): 3032–3091.
- Marcogaz. 2019. Overview of test results & regulatory limits for hydrogen admission into existing natural gas infrastructure & end use, Źródło: <https://www.marcogaz.org/publications/overview-of-test-results-regulatory-limits-for-hydrogen-admission-into-existing-natural-gas-infrastructure-end-use/> (dostęp: 12.10.2023).
- Obwieszczenie Ministra Rozwoju i Technologii z dnia 15 kwietnia 2022 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. (Dz.U. 2022 poz. 1225).
- PN-C-04753:2011. Gaz ziemny – Jakość gazu dostarczanego odbiorcom z sieci dystrybucyjnej.
- PN-EN 10208-1, 2. Rury przewodowe dla mediów palnych.
- Produkty i firmy. Informator budownictwa. 2021. Kotły gazowe i olejowe. Co trzeba wiedzieć o ogrzewaniu wodorem? Kotły Bosch H2 Ready spalające czysty wodor. Źródło: <https://budujemydom.pl/irby/porady/103122-co-trzeba-wiedziec-o-ogrzewaniu-wodorem-kotly-bosch-h2-ready-spalajace-czysty-wodor> (dostęp: 11.10.2023).
- Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2021/1119 z dnia 30 czerwca 2021 r., w sprawie ustanowienia ram na potrzeby osiągnięcia neutralności klimatycznej i zmiany rozporządzeń (WE) nr 401/2009 i (UE) 2018/1999 (Europejskie prawo o klimacie).
- Ryńska J. 2021. „Kotły na „zielony” wodor, jako element dekarbonizacji ogrzewania”. Rynek Instalacyjny (6): 20–22.
- SES Hydrogen S.A. 2022. 9 kolorów wodoru – poznaj ich znaczenie, zastosowanie i potencjał wykorzystania. Źródło: <https://seshydrogen.com/9-kolorow-wodoru-poznaj-ich-znaczenie-zastosowanie-i-potencjal-wykorzystania/> (dostęp: 21.10.2023).
- Shewczyk P., Jaworski J. 2020. „Analiza wpływu dodatku wodoru do gazu ziemnego na szczelność połączeń mechanicznych wybranych elementów sieci i instalacji gazowych”. Prace Naukowe Instytutu Nafty i Gazu (231): 1–134.
- Szoplik J., Ciusza M. 2021. „Analiza zmian w przepływie mieszanin gazu ziemnego i wodoru siecią rurociągów”. Instal (5): 22–27.
- THyGA. 2022. Review on other projects related to mitigation and identification of usable sensors in existing appliances. Źródło: https://thyga-project.eu/wp-content/uploads/20220429-D5.1-Review-of-projects-and-identification-of-existing-sensors_final.pdf (dostęp: 12.10.2023).
- Viessmann. 2023. H2 Ready: technologia wodorowa w kotłach gazowych – co warto wiedzieć o ogrzewaniu wodorem? Źródło: <https://www.viessmann.pl/pl/blog/H2-Ready-technologie-wodorowa-w-kotlach-gazowych.html> (dostęp: 11.10.2023).
- Viessmann. 2023. Klimaneutral heizen mit Wasserstoff – Lösungen von Viessmann. Źródło: <https://www.viessmann.de/de/wissen/technik-und-systeme/heizen-mit-wasserstoff.html#heizsysteme> (dostęp: 17.10.2023).
- Zabrzęski Ł., Janusz P., Liszka K., Łaciak M., Szurlej A. 2019. „Hydrogen-gas mixture compression in case of transporting through high-pressure gas pipelines” 2nd International Conference on the Sustainable Energy and Environmental Development, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science vol. 214, 012137: 1–12.