

Ocena sprawności energetycznej ogniwa paliwowego typu PEM

Evaluation of energy efficiency of PEM type fuel cell

TOMASZ MRÓZ, JOANNA SINACKA, KACPER FÓRMANIAK

DOI 10.36119/15.2025.2.3

Skojarzona gospodarka energetyczna w dużej skali jest powszechnie znana i wykorzystywana w przemyśle (elektrociepłownie przemysłowe), komunalnych systemach ciepłowniczych oraz budynkach użyteczności publicznej (szpitale, biurowce), natomiast w mniejszej skali technologia ta jest rzadko stosowana ze względu na wysokie nakłady inwestycyjne i słabo rozwinięty rynek urządzeń. Znacząco niższy współczynnik nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej dla produkcji ciepła w układach kogeneracyjnych w porównaniu do tradycyjnych układów ogrzewania (kotłownie i ciepłownie) pozwala na osiągnięcie założeń Zielonego Ładu w zakresie wzrostu efektywności energetycznej budownictwa.

W artykule przedstawiono wyniki badań efektywności energetycznej ogniwa paliwowego typu PEM zasilanego gazem ziemnym o mocy cieplnej 1,1 kW i mocy elektrycznej 0,75 kW. Pełen cykl pracy ogniwa trwa 48 godzin: 46 godzin pracy urządzenia i 2 godziny przerwy technologicznej wynikającej z konieczności jego regeneracji. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów przepływu i temperatur wody chłodzącej, zużycia gazu ziemnego oraz produkcji energii elektrycznej wyznaczono średniodobową sprawność energetyczną ogniwa oraz współczynnik nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej. W okresie objętym pomiarami średnia wartość sprawności energetycznej ogniwa wyniosła 82,1 % a współczynnika nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej 0,319, co wskazuje na atrakcyjność stosowania tego typu urządzenia jako bazowego źródła energii w budynkach mieszkalnych jednorodzinnych.

Słowa kluczowe: sprawność energetyczna, ogniwo paliwowe typu PEM

Cogenerated heat and power production on a large scale is widely known and is used in industry (industrial combined heat and power plants), municipal heating systems and public utility buildings (hospitals, office buildings). However, the application of this technology on a smaller scale is rarely implemented due to high investment costs and a poorly developed market for such equipment. Significantly lower non-renewable primary energy factor for heat production in cogeneration systems compared to traditional heating systems (boilers and heating plants), makes it possible to meet the goals of the Green Deal in terms of increasing building energy efficiency.

The article presents the results of energy efficiency evaluation of 1,1 kW heating capacity and 0,75 kW electrical power the PEM-type fuel cell powered by natural gas. The operating cycle of the fuel cell is 48 hours: 46 hours of device operation followed by a 2-hour of technological break for necessary regeneration. Measurements of cooling water flow and temperatures, natural gas consumption and electricity production allowed for derivation of daily average energy efficiency and nonrenewable primary energy effort factor of tested the fuel cell. It has been found that during the study period, the average energy efficiency and a non-renewable primary energy effort factor of the fuel cell tested have been 82.1% and 0.319 respectively, highlighting the attractiveness of using such a device as the energy source in single-family residential buildings.

Keywords: energy efficiency, PEM type fuel cell

Wprowadzenie

Jednym z ośmiu filarów strategii rozwoju Unii Europejskiej określonej mianem Zielonego Ładu jest promowanie budownictwa zrównoważonego. Wymaga to zintegrowanego podejścia do procesu projektowania, budowy oraz eksploatacji budynków. W podejściu tym budynek należy traktować jako system energetyczny

opisywany trzema poziomami zapotrzebowania na energię: (I) energię użytkową (EU), (II) energię końcową (EK) i (III) nieodnawialną energię pierwotną (EP). Dostępne na rynku rozwiązania architektoniczno-budowlane oraz instalacyjne pozwalają na minimalizację wskaźników EU oraz EK, co nie gwarantuje jednak osiągnięcia neutralności ekologicznej budynków. Efekt ten może być jedynie uzyskany

przy zagwarantowaniu minimalnych wskaźników nakładu nieodnawialnych nośników energii pierwotnej wykorzystywanych w budynkach. Jednym z rozwiązań gwarantujących tę minimalizację jest stosowanie skojarzonej gospodarki energetycznej.

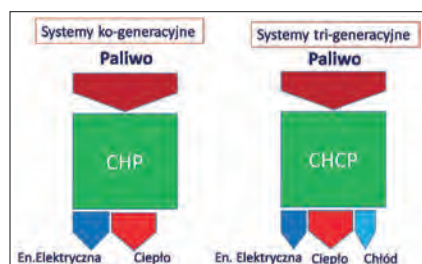
Skojarzona gospodarka energetyczna to produkcja w jednym procesie co najmniej dwóch nośników energii użytkowej

prof. dr hab. inż. Tomasz Mróz <https://orcid.org/0000-0003-2129-9198>; dr inż. Joanna Sinacka <https://orcid.org/0000-0003-3750-0319>; joanna.sinacka@put.poznan.pl, mgr inż. Kacper Fórmaniak <https://orcid.org/0009-0005-0010-8016>; kacper.formaniak@put.poznan.pl. – Instytut Inżynierii Środowiska i Instalacji Budowlanych, Politechnika Poznańska, Poznań.
Autor do korespondencji / Corresponding author: tomasz.mroz@put.poznan.pl

[1,2]. W praktyce wyróżniamy dwa możliwe sposoby realizacji skojarzonej gospodarki energetycznej:

- Kogeneracja – jednoczesna produkcja ciepła i energii elektrycznej (CHP),
- Trigeneracja – jednoczesna produkcja ciepła, energii elektrycznej oraz chłodu (CHCP).

Na rysunku 1 przedstawiono w formie wykresów pasmowych bilansu energii wyżej wymienione sposoby realizacji gospodarki skojarzonej.



Rys. 1.

Wykres pasmowy bilansu energii dla układów kogeneracyjnych i trigeneracyjnych
Fig. 1. Stripe drawing of energy balance of co-generation and tri-generation systems

Skojarzona gospodarka energetyczna w dużej skali jest powszechnie znana i wykorzystywana w przemyśle (elektrociepłownie przemysłowe) [3] jak i w komunalnych systemach ciepłowniczych [4]. Często jest ona również wykorzystywana w budynkach użyteczności publicznej (szpitale, biurowce) [5]. Aplikacje tej technologii w mniejszej skali są incydentalne ze względu na wysokie nakłady inwestycyjne i w niewielkim stopniu rozwinięty rynek urządzeń.

Pozytywny wpływ zastosowania kogeneracji na minimalizację zużycia nośników nieodnawialnej energii pierwotnej w budownictwie wyznaczany jest z wykorzystaniem metody kosztów unikniętych, której matematyczny zapis przedstawia układ równań (1) do (3).

Zużycie nieodnawialnej energii pierwotnej w systemie kogeneracyjnym dla produkcji ciepła i energii elektrycznej:

$$EP_{CHP} = \frac{Q_{HEX} + E_{EI}}{\eta_{CHP}} \quad (1)$$

Zużycie nieodnawialnej energii pierwotnej w systemie rozdzielonym dla produkcji ciepła i energii elektrycznej (produkcja ciepła w ciepłowni i produkcja energii elektrycznej w źródłach systemowych):

$$EP_{HP+PP} = \frac{Q_{HEX}}{\eta_{HP}} + \frac{E_{EI}}{\eta_{PP}} \quad (2)$$

Zużycie nieodnawialnej energii pierwotnej w systemie kogeneracyjnym dla produkcji wyłącznie ciepła:

$$EP_{CHP}^{Heat} = Q_{HEX} \cdot \left(\frac{1+e}{\eta_{CHP}} - \frac{e}{\eta_{PP}} \right) \rightarrow e = \frac{E_{EI}}{Q_{HEX}} \quad (3)$$

gdzie:

Q_{HEX} – Ciepło wyprodukowane w układzie kogeneracyjnym, kWh,

E_{EI} – Energia elektryczna wyprodukowana w układzie kogeneracyjnym, kWh,

$H_{F,Ch}$ – Entalpia chemiczna paliwa zużytego w układzie kogeneracyjnym, kWh,

η_{CHP} – Sprawność energetyczna układu kogeneracyjnego,

η_{PP} – Sprawność energetyczna wytwarzania i przesyłu energii elektrycznej w miksie energetycznym,

e – Wskaźnik skojarzenia dla układu kogeneracyjnego.

W konsekwencji współczynnik nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej dla produkcji ciepła w układach kogeneracyjnych jest znacząco niższy (poniżej wartości 1,0) niż dla tradycyjnych układów ogrzewania, takich jak kotłownie czy ciepłownie.

Zmieniające się strategie gospodarowania energią związane z wprowadzeniem w Unii Europejskiej idei Zielonego Ładu (Green Deal), powodują wzrost zainteresowania technologiami kogeneracyjnymi w małej skali. Szczególnie interesująca technologia skojarzonej produkcji ciepła i energii elektrycznej mogąca mieć zastosowanie w niewielkich budynkach mieszkalnych jednorodzinnych i wielorodzinnych to technologia ogniw paliwowych z membranami proton-wymiennymi – PEM (Protone Exchange Membrane).

Ogniwo paliwowe PEM jako źródło energii dla budynku

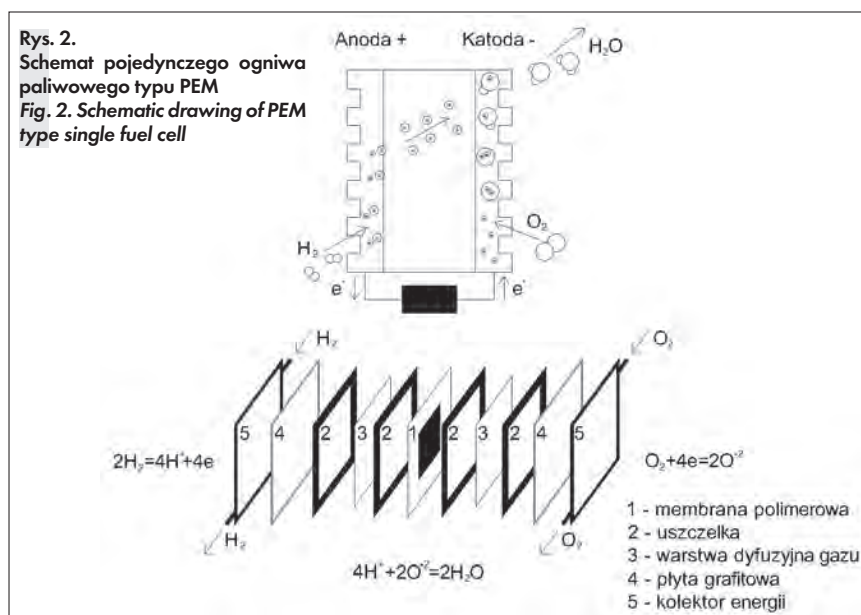
Ogniwa paliwowe typu PEM pojawiły się na początku lat 50. XX wieku jako mobilne źródła energii elektrycznej dla potrzeb militarnych. W latach 60. XX wieku ich zastosowanie było warunkiem sukcesu misji kosmicznych NASA – projekt Gemini [6]. Pod koniec XX wieku technologię tę zaczęto komercjalizować w Japonii, obecnie technologia ta dostępna jest również w Polsce.

Na rysunku 2 przedstawiono schemat pojedynczego ogniwa paliwowego typu PEM wraz z opisem reakcji elektrochemicznych, które skutkują produkcją ciepła i energii elektrycznej.

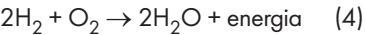
Ogniwo paliwowe w wyniku przemiany elektrochemicznej konwertuje entalpię chemiczną paliwa w energię elektryczną i ciepło. Odbyna się to przy wysokiej sprawności wytwarzania energii elektrycznej z racji realizacji procesu w sposób bezpośredni, bez wykorzystania przemian pośrednich, na przykład wytwarzających w pierwszej kolejności pracę mechaniczną a następnie energię elektryczną [7].

W ogniwie paliwowym PEM zasilałym wodorem wykorzystana jest membrana polimerowa [3]. Wodór (H_2) doprowadzany jest do anody w ogniwie, zaś do katody dostarcza się utleniacz – tlen (O_2). Katalizatorem dysocjacji wodoru na protony (H^+) i elektrony jest anoda – rys. 2. Membrana polimerowa pełni funkcję izolatora dla elektronów, stąd przechodzą przez nią wyłącznie protony. Elektrony poruszają się po zewnętrznym obwodzie wywołując przepływ energii elektrycznej. Reakcja chemiczna zdysocjowanych z wodoru protonów i elektronów z tlenem

Rys. 2. Schemat pojedynczego ogniwa paliwowego typu PEM
Fig. 2. Schematic drawing of PEM type single fuel cell



odbywa się na katodzie. W wyniku bezpośredniej przemiany entalpii chemicznej paliwa, poprzez dysocjację wodoru na anodzie i reakcję zdysocjowanych protonów i elektronów z utleniaczem na katodzie, otrzymywana jest energia elektryczna oraz czysta woda [8] – równanie (4).

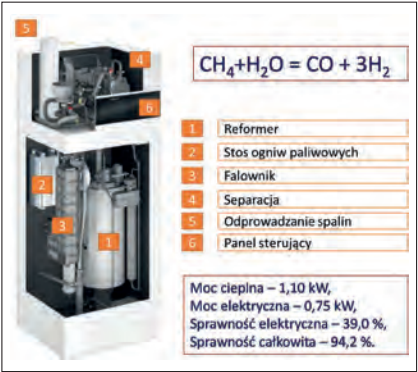


Tlen jest dostarczany do ogniwa paliwowego z powietrza, drugi z reagentów – wodór, jako źródło energii napędowej dla ogniwa paliwowego typu PEM może być pozyskiwany z różnych źródeł [9]:

- Wodór szary – wytwarzany w procesie reformingu z paliw węglowodorowych,
- Wodór zielony – wytwarzany w procesie elektrolizy wody z wykorzystaniem energii odnawialnej,
- Wodór fioletowy – wytwarzany w procesie elektrolizy wody z wykorzystaniem energii elektrycznej produkowanej w elektrowniach jądrowych,
- Wodór niebieski – wytwarzany w procesach wykorzystujących paliwa kopalne, uzupełnione o technologie wychwytywania, składowania lub przetwarzania CO₂,
- Wodór biały – pochodzący z naturalnych źródeł geologicznych.

Z powodu braku powszechnej dostępności źródeł wodoru obecnie ogniwa paliwowe często wykorzystują wodór szary, wytwarzany w procesie reformingu z gazu ziemnego. Proces ten generuje dodatkowo CO₂ co pogarsza ocenę ekologiczną ogniwa wodorowego, jednak w porównaniu do technologii wytwarzania energii opartych na spalaniu paliw kopalnych, nawet w tej konfiguracji jest ono stosunkowo wysoko oceniane [7].

Zastosowanie ogniwa paliwowego typu PEM jako elementu układu zaopatrującego w energię elektryczną wioskę Kulin w Iranie zostało opisane przez Zahadi'ego i in. [10]. Autorzy na bazie przeprowadzonych symulacji wykazali wyższą efektywność energetyczną oraz ekonomiczną tej technologii w porównaniu z rozwiązaniami opartymi o magazynowanie energii. Xu i in. [11] zwrócili uwagę na zwiększenie efektywności wykorzystania wodoru w ogniwach paliwowych typu PEM, szczególnie skupiając się na zagadnieniu rozcieńczania wodoru. Wyniki badań wykazały, że stopień rozcieńczenia wodoru ma wpływ na wydajność ogniwa, co związane jest ze zmniejszeniem ciśnienia wodoru na anodzie. Wykazano jednak, iż umiarkowane rozcieńczanie wodoru jest dopuszczalne i pozytywnie wpływa na efektywność ekonomiczną pracy ogniwa.



Rys. 3. Dane techniczne ogniwa paliwowego typu PEM firmy Viessmann
Fig. 3. Technical data of type PEM fuel cell delivered by Viessmann [13]

Doucet i in. [12] badając pracę ogniwa paliwowego PEM w trybie skojarzonej produkcji energii elektrycznej i ciepła stwierdzili, iż jest to rozwiązanie mogące mieć zastosowanie jako efektywne źródło energii dla budynków mieszkalnych.

W 2024 r. w Zakładzie Ogrzewnictwa, Klimatyzacji i Ochrony Powietrza Politechniki Poznańskiej uruchomiono laboratorium wodorowe, którego celem jest prowadzenie badań efektywności energetycznej ogniwa paliwowego typu PEM zasilanego gazem ziemnym. Laboratorium powstało we współpracy z firmą Viessmann, która dostarczyła ogniwo paliwowe o danych technicznych przedstawionych na rysunku 3 [13].

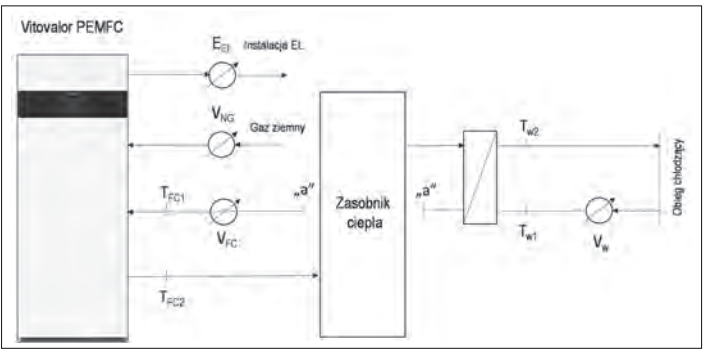
Badania sprawności energetycznej ogniwa paliwowego typu PEM

Schemat stanowiska pomiarowego do badań efektywności energetycznej ogniwa paliwowego przedstawiono na rysunku 4 a jego zdjęcia na rysunkach 5 do 7.

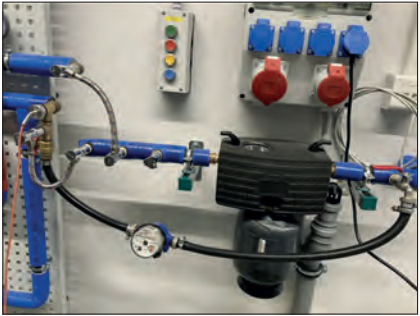
W badaniach wykorzystano następujące elementy i układy pomiarowe:

- Pomiar temperatur wody chłodzącej – czujniki PT100 skalibrowane według termometru elektronicznego (nr kat. 5000-0795) z czujnikiem PT100 (nr kat. 6000-1773), dokładność pomiaru +/- 0,03 K,

Rys. 4. Schemat stanowiska pomiarowego
Fig. 4. Schematic drawing of experimental setup



Rys. 5. Zdjęcie badanego ogniwa paliwowego z zasobnikiem ciepła
Fig. 5. Picture of tested fuel cell with heat accumulator



Rys. 6. Zdjęcie instalacji pomiarowej – pomiar zużycia wody chłodzącej
Fig. 6. Picture of tested installation – cooling water use measurement

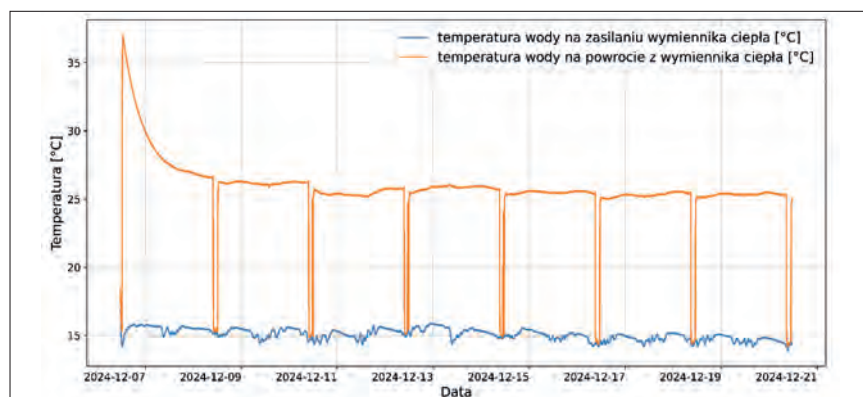


Rys. 7. Zdjęcie instalacji pomiarowej – pomiar temperatur wody chłodzącej
Fig. 7. Picture of tested installation – cooling water temperatures measurement

- Pomiar zużycia wody chłodzącej – wodomierz skrzydełkowy, dokładność pomiaru $\pm 0,001 \text{ m}^3$,
- Pomiar zużycia gazu ziemnego – gazomierz, dokładność pomiaru $\pm 0,001 \text{ Nm}^3$,
- Pomiar ilości energii elektrycznej wytworzonej przez ogniwo – licznik energii elektrycznej dwukierunkowy, dokładność pomiaru $\pm 0,01 \text{ kWh}$.

Pomierzone temperatury wody chłodzącej rejestrowane były w czasie rzeczywistym poprzez system zbierania danych Almemo System z krokiem czasowym 1 minuta.

Wyniki pomiarów temperatur wody chłodzącej przedstawiono na rysunku 8, natomiast na rysunku 9 wyniki pomiarów zużycia gazu ziemnego i produkcji energii elektrycznej oraz ciepła przez ogniwo.



Rys. 8.

Wyniki pomiarów – zmienność temperatur wody chłodzącej

Fig. 8. Experiment results – variation of cooling water temperatures

Pełen cykl pracy ogniwa paliwowego trwa 48 godzin: 46 godzin pracy uruchomienia i 2 godziny przerwy technologicznej wynikającej z konieczności jego regeneracji.

Warunki pracy systemu ustabilizowały się po 48 godzinach od zadania parametrów pracy. Podczas okresu badawczego (09÷20.12.2024 r.) temperatura wody chłodzącej na zasilaniu wymiennika cie-

pła wahała się między $13,9^\circ\text{C}$ a $15,9^\circ\text{C}$, a jej średnia wartość to $15,0^\circ\text{C}$. Natomiast temperatura wody chłodzącej na wyjściu z wymiennika ciepła mieściła się w zakresie $14,2\div 26,3^\circ\text{C}$, a jej średnia wartość to 25°C . Dobowe zużycie wody chłodzącej przepływającej przez wymiennik ciepła wahało się między $1,806 \text{ m}^3/\text{dobę}$ a $1,975 \text{ m}^3/\text{dobę}$ (średnia wartość to $1,946 \text{ m}^3/\text{dobę}$).

Dobowe zużycie gazu zmieniało się pomiędzy $4,565 \text{ m}^3/\text{dobę}$ a $5,113 \text{ m}^3/\text{dobę}$ (średnia wartość to $4,789 \text{ m}^3/\text{dobę}$), dobowa produkcja ciepła była w zakresie $21,32\div 24,07 \text{ kWh}/\text{dobę}$ (średnia wartość to $22,6 \text{ kWh}/\text{dobę}$) a dobowa produkcja energii elektrycznej wahała się między $15 \text{ kWh}/\text{dobę}$ a $17 \text{ kWh}/\text{dobę}$ (średnia wartość to $15,87 \text{ kWh}/\text{dobę}$).

Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów wyznaczono średniodobową sprawność energetyczną ogniwa – zależność (5).

$$\eta_{\text{PEMFC}} = \frac{Q_{\text{HEX}} + E_{\text{El}}}{H_{\text{F,Ch}}} \quad (5)$$

gdzie:

Q_{HEX} – Ciepło wyprodukowane przez ogniwo paliwowe w ciągu doby, kWh,

E_{El} – Energia elektryczna wyprodukowana przez ogniwo paliwowe w ciągu doby, kWh,

$H_{\text{F,Ch}}$ – Entalpia chemiczna gazu ziemnego zużytego przez ogniwo w ciągu doby, kWh.

Ciepło wyprodukowane przez ogniwo paliwowe w ciągu doby wyznaczono z dobowego przyrostu entalpii wody chłodzącej wymiennik ciepła w obiegu wtórnym ogniwa paliwowego – równanie (6).

$$Q_{\text{HEX}} = V_w \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot \delta T_w \quad (6)$$

gdzie:

V_w – Objętość wody przepływającej przez wymiennik ciepła w ciągu doby, m^3 ,

c_w – Średnie ciepło właściwe wody przy stałym ciśnieniu, $\text{kWh} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,

ρ_w – Średnia gęstość wody, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$,

δT_w – Średni dobowy przyrost temperatury wody chłodzącej wymiennik ciepła, K.

Dobową produkcję energii elektrycznej przez ogniwo odczytano z licznika produkcji energii elektrycznej.

Dobowe zużycie entalpii chemicznej paliwa przez ogniwo wyznaczono z dobowego zużycia gazu ziemnego – równanie (7).

$$H_{\text{F,Ch}} = V_{\text{NG}} \cdot LHV_{\text{NG}} \quad (7)$$

gdzie:

V_{NG} – Objętość gazu ziemnego zużytego przez ogniwo w ciągu doby, Nm^3 ,

LHV_{NG} – Wartość opałowa gazu ziemnego, $\text{kWh} \cdot \text{Nm}^{-3}$.

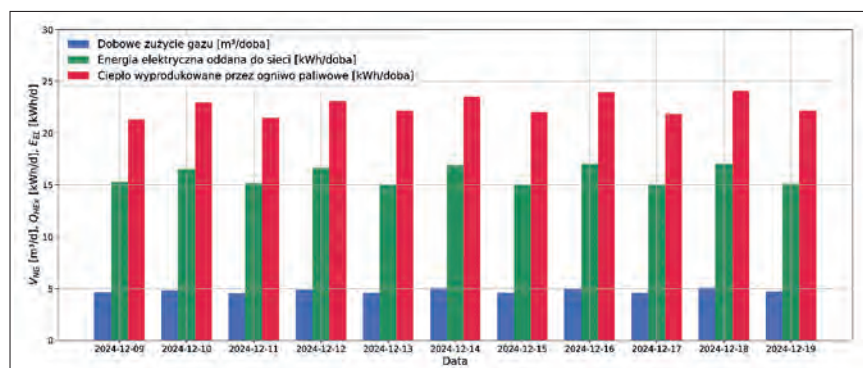
Wartość opałowa gazu ziemnego równa $35,16 \text{ MJ}/\text{m}^3$, została obliczona na podstawie deklarowanej przez Wielkopolską Spółkę Gazownictwa – dostawcę paliwa, wartości ciepła spalania.

Współczynnik nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej wyznaczono z równania (8).

$$w_{\text{PEMFC}} = \frac{1 + e}{\eta_{\text{PEMFC}}} - \frac{e}{\eta_{\text{PP}}} \rightarrow e = \frac{E_{\text{El}}}{Q_{\text{HEX}}} \quad (8)$$

Na rysunku 10 przedstawiono wyznaczoną na podstawie przeprowadzonych pomiarów zmienność średniodobowej sprawności energetycznej oraz współczynnika nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej badanego ogniwa paliwowego.

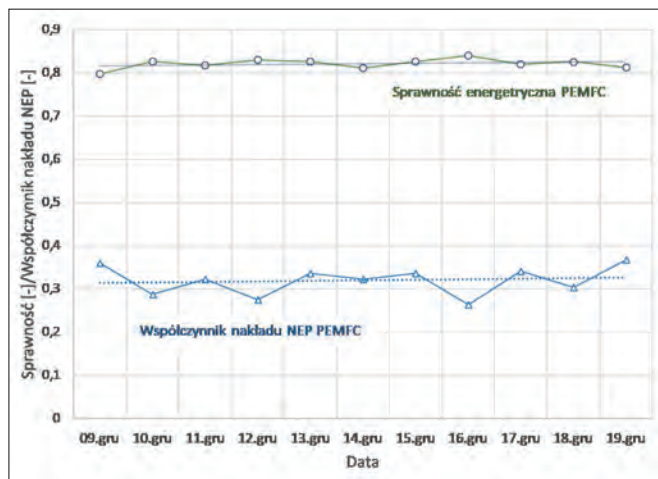
W badanym okresie sprawność energetyczna ogniwa paliwowego wahała się w zakresie $79,7 \div 84\%$, a średnia wartość wyniosła $82,1\%$. Współczynnik nakładu



Rys. 9.

Wyniki pomiarów – zużycie gazu ziemnego oraz produkcja energii elektrycznej i ciepła przez ogniwo

Fig. 9. Experiment results – fuel cell natural gas consumption and electricity and heat production



Rys. 10.
Zmienność średniodo-
bowej sprawności
energetycznej oraz
wskaźnika nakładu
nieodnawialnej ener-
gii pierwotnej bada-
nego ogniwa
Fig. 10.
Variation of
daily average energy
efficiency and prima-
ry energy effort factor
of tested fuel cell

nieodnawialnej energii pierwotnej mieścił się w zakresie $0,264 \div 0,367$, a średnia wartość wyniosła $0,319$. Zwłaszcza drugi z parametrów wskazuje na atrakcyjność stosowania tego typu urządzenia jako bazowego źródła energii w budynkach mieszkalnych jednorodzinnych. Wyznaczona wartość współczynnika nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej przedstawia się korzystniej niż wszystkie określone w rozporządzeniu wartości wskaźnika nieodnawialnej energii pierwotnej dla paliw kopalnych analizowanych dla miejscowego wytwarzania energii w budynku, w tym np. wartość określoną dla wykorzystania biogazu ($0,50$). Określona dla analizowanego ogniwa paliwowego wartość wskaźnika nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej pozostaje także zbliżona do wartości wskaźnika określonego dla wykorzystania biomasy w trybie miejscowego wytwarzania energii w budynku, która wynosi $0,20$ [15]. Porównanie to pozwala stwierdzić, że pod względem wskaźnika nieodnawialnej energii pierwotnej ogniwo paliwowe jest jednym z bardziej atrakcyjnych spośród dostępnych rozwiązań.

Roczna produkcja ciepła badanego ogniwa paliwowego, obliczona ze średniej dobowej produkcji ciepła ($22,6 \text{ kWh/dobę}$), to 8252 kWh/rok , a roczna produkcja energii elektrycznej to 5794 kWh/rok . Według badań przeprowadzonych przez GUS [14] w 2021 roku w gospodarstwach domowych na wsi, które nie prowadzą działalności rolniczej średnie roczne zużycie energii elektrycznej wynosiło 2936 kWh/rok , a w gospodarstwach prowadzących działalność rolniczą 4247 kWh . Oznacza to, że badane ogniwo paliwowe pokrywa całkowicie zapotrzebowanie na energię elektryczną typowego domu jednorodzinnego bez względu na to czy prowadzona jest w nim działalność rolnicza.

Ogniwa paliwowe typu PEM mogą stać się, akceptowalną z punktu widzenia

strategii energetycznych Unii Europejskiej (Zielony Ład), alternatywą dla prostego wykorzystania paliw kopalnych, w tym gazu ziemnego w budynkach.

Wnioski końcowe

Współczesne budynki należy traktować jako złożone systemy energetyczne. Osiągnięcie założeń Zielonego Ładu w zakresie wzrostu efektywności budownictwa wymusza kompleksowe podejście do projektowania nowych i modernizacji istniejących budynków. Podejście takie wymaga działań dotyczących obudowy budynku, jego instalacji wewnętrznych jak i właściwego doboru technologii energetycznych oraz nośników energii pierwotnej.

Przeprowadzone wstępne badania potwierdzają, iż technologią energetyczną, która może znaleźć zastosowanie we współczesnych budynkach jest technologia ogniw paliwowych PEM zasilanych wodorem pozyskiwanym z reformingu gazu ziemnego (wodór szary), a docelowo wodorem wytwarzanym z wykorzystaniem odnawialnych nośników energii. Jednoczesna produkcja energii elektrycznej oraz ciepła (kogeneracja) w jednym urządzeniu to rozwiązanie pozwalające na osiągnięcie założeń zrównoważonego budownictwa i dające możliwość jednoczesnej dywersyfikacji zdolności produkcji ciepła i energii elektrycznej lub całkowite uniezależnienie się od dostawcy energii elektrycznej.

W laboratorium wodorowym Instytutu Inżynierii Środowiska i Instalacji Budowlanych Politechniki Poznańskiej planowane są dalsze badania efektywności energetycznej ogniwa wodorowego typu PEM oraz badania modelowe współpracy ogniwa z różnymi szczytowymi źródłami ciepła uwzględniające rzeczywiste obciążenia cieplne budynku.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Mróz T.: Energy management in built environment : tools and evaluation procedures, Publishing House of Poznań University of Technology, 2022.
- [2] Szargut J., Ziębik A.: Podstawy energetyki cieplnej. PWN Warszawa, 2000.
- [3] Mróz T.: Thermodynamic and economic performance of the LiBr-H₂O single stage absorption water chiller, Applied Thermal Engineering 26 (2006) pp. 2103-2109. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.04.013.
- [4] Turski M., Sekret R.: Buildings and a district heating network as thermal energy storages in the district heating system. Energy and Buildings, 179 (2018) pp. 49–56. doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.09.015.
- [5] Gąsiorowski P., Mróz T.: Energy and exergy evaluation of tri-generation system based on natural gas fired micro-turbine – a case study: Instal 11 (2023) s. 9-13. doi.org/10.36119/15.2023.11.1.
- [6] Breeze P.: Fuel Cells, Power Generation Technologies, Elsevier Ltd. 2014 pp. 129-152.
- [7] Ceran B.: Badania modelowe ogniw paliwowych typu PEM, Poznan University of Technology Academic Journals, Electrical Engineering 70 (2012) str. 286-290.
- [8] Ceran B.: Ogniwa paliwowe w generacji rozproszonej, Poznan University of Technology Academic Journals, Electrical Engineering 74 (2013) str. 203-209.
- [9] https://www.ey.com/pl_pl/insights/climate-change-sustainability-services/wodor-zielony-niebieski-szary-wszystkie-kolory-wodoru (wejście 2025-01-17).
- [10] Zahedi B., Al-bonsrulah H. A. Z., Tafavogh M.: Conceptual design and simulation of a stand-alone Wind/PEM fuel Cell/ Hydrogen storage energy system for off-grid regions, a case study in Kuhn, Iran, Sustainable Energy Technologies and Assessments 57 (2023).
- [11] Xu L., Xu L., Shao Y., Zhang X., Hu Z., Li J., Ouyang M.: Effects of hydrogen dilution on performance and in-plane uniformity of large-scale PEM fuel cell with low anode catalyst loading, Applied Energy 379 (2025). doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124992.
- [12] Doucet G., Etievant C., Puyechet C., Grigoriev S., Millet P.: Hydrogen-based PEM auxiliary power unit, International Journal of Hydrogen, Energy 34 (2009) s. 4983-4989. doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.12.029.
- [13] <https://www.viessmann-climatesolutions.com/en/newsroom/solution-offering/vitovallor-pa2-fuel-cell-heating-device.html> (wejście 2025-01-17).
- [14] Cierpiat-Wolan M. (red.): Zużycie energii w gospodarstwach domowych w 2021 r., Główny Urząd Statystyczny, Urząd Statystyczny w Rzeszowie, Warszawa, Rzeszów (2023).
- [15] Rozporządzenie Ministra Rozwoju i Technologii z dnia 28 marca 2023 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku lub części budynku oraz świadectw charakterystyki energetycznej.