

Magdalena DUDEK

# Czy wodór może być magazynem i nośnikiem energii w budownictwie?

**Abstrakt:** W artykule scharakteryzowano podstawowe warianty wykorzystania wodoru jako magazynu i nośnika energii, a także ogniw paliwowych w energetyce rozproszonej. Przedstawiono możliwości integracji rozwiązań technologii wodorowych i ogniw paliwowych z odnawialnych źródeł energii w systemach niezależnego zasilania dla budownictwa. Wodór wytwarzany w procesie elektrolizy może być magazynowany w skalowalnych zbiornikach wysokociśnieniowych (200–350 barów) oraz w niskociśnieniowych magazynach wodoru, a następnie wykorzystany do produkcji energii elektrycznej z ogniw paliwowych. Interesującą opcją jest również wykorzystanie alternatywnych paliw (np. metanolu) jako nośników wodoru do budowy pomocniczych układów zasilania w budownictwie. Kolejną ważną cechą rozważanych układów rozproszonych jest możliwość uzyskania wariantowego ciepła, zarówno z ogniw paliwowych, jak i w procesach wodorowych.

**Słowa kluczowe:** energia elektryczna, wodór, ogniwo paliwowe, skojarzone wytwarzanie energii elektrycznej i ciepła, metanol

## Budownictwo jednorodzinne na przestrzeni ostatnich 20 lat

Przy budowie domu jednorodzinnego ważną dla inwestorów kwestią jest komfort użytkowania budynku. Pod tym względem niewątpliwie najważniejszymi czynnikami są lokalizacja działki budowlanej oraz projekt architektoniczny domu zapewniający przestrzeń i wygodę mieszkania. Kolejną przesłanką to koszt użytkowania budynku, związany głównie z pokryciem zapotrzebowania na media takie jak elektryczność, ciepło do ogrzewania pomieszczeń (c.o.), ciepła woda użytkowa (c.w.u.) czy klimatyzacja w sezonie letnim. Z analiz zmian profilu rocznego zapotrzebowania na energię elektryczną i ciepło w budynkach wynika, że największa energochłonność w gospodarstwach domowych dotyczy ogrzewania pomieszczeń (c.o.), przygotowania ciepłej wody użytkowej (c.w.u.) i przyrządzenia posiłków. W naszym kraju przez długi czas

używano do tego celu głównie węgla kamiennego i gazu ziemnego, a następnie stopniowo upowszechniało się stosowanie paliw z biomasy.

Z roku na rok notuje się stopniowy wzrost wykorzystania w indywidualnych gospodarstwach domowych kolektorów słonecznych na potrzeby przygotowania c.w.u. oraz mikroinstalacji fotowoltaicznych do produkcji energii elektrycznej, które w połączeniu z pompami ciepła mogą zapewniać ogrzewanie budynku i przygotowanie ciepłej wody użytkowej.

Podstawową niedogodnością w użytkowaniu odnawialnych źródeł energii (OZE) w gospodarstwach domowych jest zmienność produkcji energii w czasie. W przypadku mikroinstalacji fotowoltaicznych w ciągu doby produkcja energii elektrycznej zachodzi tylko w ciągu dnia, i tylko, jeśli jest to dzień słoneczny. Ze względu na intensywność nasłonecznienia instalacja fotowoltaiczna najwięcej energii elektrycznej produkuje w okresie wiosenno-letnim. Niewykorzystane nadwyżki energii (ze słonecznego dnia czy w okresie letnim) przewyższają z reguły zapotrzebowanie odbiorców na energię elektryczną w budynkach i, dzięki systemowi opustów obowiązujących w przypadku prosumenckich mikroinstalacji fotowoltaicznych, mogą zostać zmagazynowane w sieci elektroenergetycznej, zaś w przypadku niedoboru energii – odebrane z sieci. Dobrym nośnikiem energii, a także jej magazynem, może być wodór. W tym przypadku mówimy o magazynowaniu długookresowym, gdyż wodór może być przechowywany przez długi czas bez zmiany parametrów użytkowych jako paliwa, w przeciwieństwie do paliw stałych czy płynnych, które starzeją się i tracą swoje właściwości fizykochemiczne (Gałuszka et Paruch 2008).

## Wodór jako magazyn i nośnik energii w energetyce rozproszonej

Obecnie w świecie wzrasta zainteresowanie wodorem jako magazynem i wtórnym nośnikiem energii. Wodór może być magazynowany w postaci gazowej (pod niskim lub wysokim ciśnieniem) bądź ciekłej lub też w postaci innych nośników, którymi są np. alkohole (metanol, etanol) czy amoniak  $\text{NH}_3$ .

Wodór jest podstawowym reagentem zasilającym ogniwa paliwowe, których ciągły rozwój technologiczny daje nadzieję na rozwiązanie wielu problemów energetycznych współczesnego świata. O popularności idei stosowania wodoru jako nośnika i magazynu energii, szczególnie w krajach o najwyższym rozwoju gospodarczym, świadczy powstanie i ugruntowanie nowych pojęć, takich jak „gospodarka wodorowa” (*hydrogen economy*) czy „społeczeństwo wodorowe” (*hydrogen community*) (Yahyaoui 2018a, 2018b).

Gospodarka wodorowa obejmuje swoim zakresem: produkcję, magazynowanie/transport oraz wykorzystanie paliwa wodorowego. Wodór w stanie wolnym na Ziemi właściwie nie występuje, jednak powszechna jest jego obecność w związkach chemicznych. Podobnie jak elektryczność, jest on tzw. wtórnym nośnikiem energii – do celów energetycznych musi być pozyskany z innych surowców (np. z paliw kopalnych, biomasy, materiałów odpadowych) lub wytworzony z wykorzystaniem OZE. Wodór jest podstawowym paliwem do zasilania ogniw paliwowych, ale może być także stosowany jako paliwo do silników spalania wewnętrzne czy turbin gazowych. W efekcie spalania tego gazu powstają woda i ciepło odpadowe.

Ogniwa paliwowe (OP) to urządzenia elektrochemiczne, w których zachodzi bezpośrednia konwersja energii chemicznej paliwa na energię elektryczną i ciepło. Warto podkreślić, że urządzenia te od lat przyciągają uwagę ze względu na możliwość wykorzystania ich jako generatorów energii elektrycznej w szerokim zakresie mocy elektrycznej (od kilku watów do megawatów). OP należą do ogniw galwanicznych, tak jak baterie pierwotne i akumulatory, w których jednak reagenty chemiczne (paliwo, np. wodór, czy utleniacz – tlen)

doprowadzane są z zewnątrz. Dostępność i wielkość magazynu paliwa (głównie wodoru) są czynnikami determinującymi czas działania ogniw paliwowych.

Wodorowo-tlenowe ogniwa paliwowe produkują energię elektryczną. Produktem ubocznym jest ciepło odpadowe i woda. Urządzenia te mogą stanowić układy skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła (*combined heat and power*). Z kolei elektrolizery wodoru to urządzenia, w których pod wpływem dostarczonej energii elektrycznej następuje rozkład wody na wodór i tlen. Obecne zainteresowania elektrolizerami wodoru wynikają z możliwości wykorzystania nadwyżek z produkcji energii elektrycznej do produkcji wodoru. W przypadku elektrolizerów wodoru produktami odpadowymi są tlen gazowy (jako współprodukt procesu elektrolizy wody), a także ciepło, które można odzyskać do dalszego wykorzystania. Warto podkreślić, że te same urządzenia mogą często również pracować jako generator energii elektrycznej lub elektrolizer wodoru. Rozwiązania takie noszą nazwę odwracalnych ogniw paliwowych (*reversible fuel cells*). Zarówno ogniwa paliwowe, jak i elektrolizery należą do urządzeń skalowalnych, modułowych, mogą być budowane jako jedno kompletne urządzenie lub zostać złożone z jednostek modułowych o mniejszej mocy (Srinivasan 2006).

Energetyka rozproszona jest ważnym elementem składowym niskoemisyjnego, sprawnego systemu energetycznego. Obecnie w świecie można zaobserwować coraz częstsze wykorzystanie ogniw paliwowych w budowaniu systemów energetycznych, zarówno dla zastosowań stacjonarnych, jak i transportowych. Kryteria klasyfikacji ogniw paliwowych bazują zazwyczaj na dwóch czynnikach: rodzaju stosowanego elektrolitu i temperaturze pracy. Pod tym względem można wyróżnić pięć podstawowych typów ogniw paliwowych: z membraną polimerową (*proton exchange membrane fuel cells*, PEMFCs, temperatura pracy 30–80°C), alkaliczne (*alkaline fuel cells*, AFCs, temperatura pracy 50–200°C), zawierające kwas fosforowy w funkcji elektrolitu (*phosphoric acid fuel cells*, PAFCs, temperatura pracy ok. 220°C), węglanowe (*molten carbonate fuel cells*, MCFCs, temperatura pracy ok. 650°C), stałotlenkowe (*solid oxide fuel*

cells, SOFCs, temperatura pracy 800–850°C). Obecnie najszybszy rozwój technologiczny obserwowany jest dla wodorowo-tlenowych OP z elektrolitem stałym, tj. dla ogniwo PEMFC lub SOFC. OP-PEMFC znajdują zastosowanie praktyczne: w stacjonarnych generatorach energii elektrycznej, pomocniczych urządzeniach zasilających (*auxiliary power units*), źródłach energii używanych do budowy jednostek transportowych w motoryzacji, lotnictwie, kolejnictwie, żegludzie śródlądowej itp. Ogniwa paliwowe mogą pracować w szerokim zakresie mocy elektrycznej  $P$ , tj. od ok. 10 W do ok. 60 MW (Yahyaoui 2018a, 2018b).

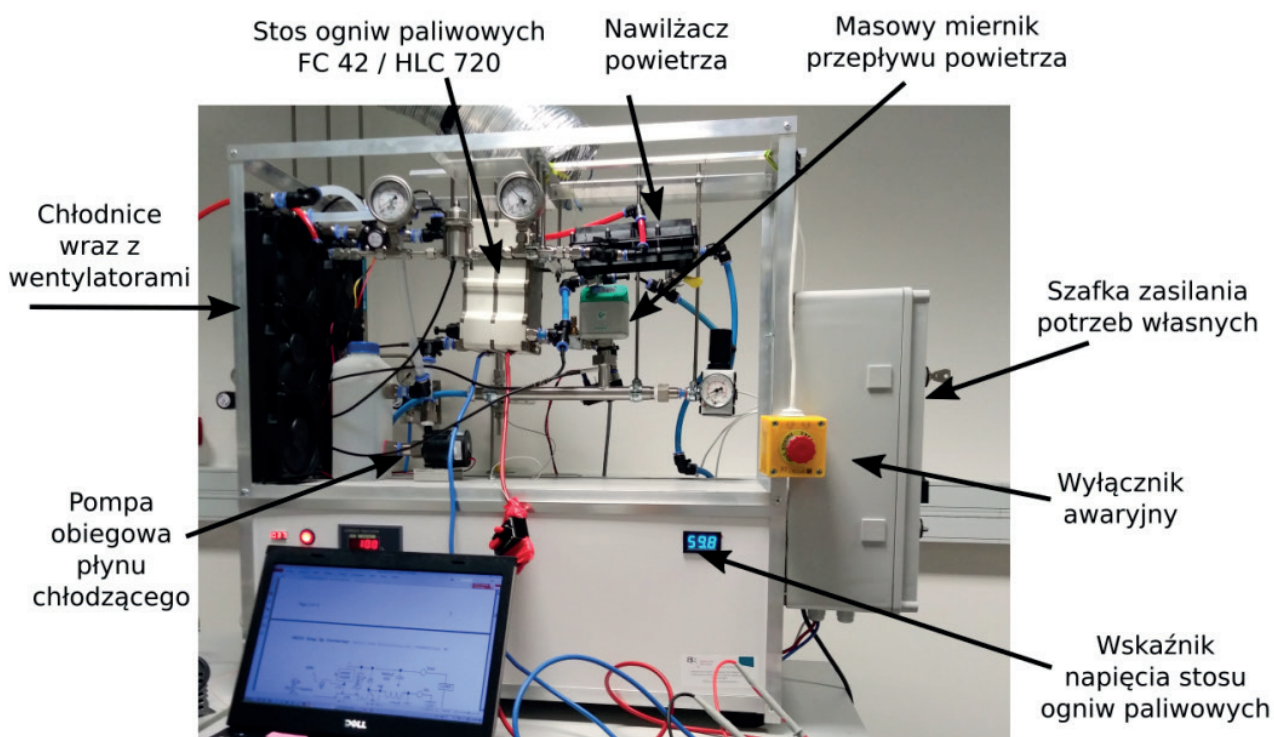
## Zastosowanie ogniwo paliwowych PEMFC i SOFC w budownictwie

Ogniwa paliwowe od dawna uznawane są za potencjalnie najlepsze urządzenia dla układów CHP (*micro combined heat and power*). Zachodzące w nich skojarzone wytwarzanie energii elektrycznej i ciepła wzbudza coraz większe zainteresowanie w różnych sektorach gospodarki ze względu na wysoką sprawność konwersji energii (sprawność elektryczna na poziomie 40–65%, sprawność zintegrowana, czyli elektryczna plus termiczna, na poziomie 85–90%), bardzo niski poziom hałasu i wibracji, potencjalnie niskie koszty obsługi, a także możliwość łatwej zabudowy i skalowania. Czasami urządzenia te nazywane są również „grzewczymi ogniwoami paliwowymi” – takie określenie po raz pierwszy zostało użyte przez firmę Vaillant na jej polskiej stronie internetowej. Paliwem w OP jest gaz ziemny dostarczany siecią gazowniczą, który po reformingu wykorzystywany jest do zasilania stosu ogniwo paliwowych. Zazwyczaj moc elektryczna stosu w grzewczym ogniwie paliwowym, które stanowi źródło energii, wynosi od 1 kW do 10 kW (najbardziej popularne są jednostki o mocy 1–2 kW). Oprócz energii elektrycznej, podczas pracy ogniwa paliwowego wytwarzane jest ciepło odpadowe, które można wykorzystać do ogrzewania. Urządzenia tego typu często wyposażone są w dodatkowy zestaw palników gazowych, które włączają się automatycznie

w przypadku niedoboru energii cieplnej. Małe generatory energii elektrycznej zawierające ogniwa paliwowe, zainstalowane w gospodarstwach indywidualnych, mogą zostać połączone w sieć lokalną sterowaną centralnie – stworzą wówczas wirtualną elektrownię. Takie rozwiązanie, typowe dla tzw. energetyki rozproszonej, przynosi znaczne korzyści ekonomiczne, zwiększa również lokalne bezpieczeństwo energetyczne. Na podstawie doświadczeń praktycznych dotyczących użytkowania ogniwo paliwowych w układach CHP można stwierdzić, że w domowych generatorach energii elektrycznej i cieplnej mogą być stosowane głównie dwa typy ogniwo paliwowych: OP z elektrolitem polimerowym (PEMFC) oraz OP o geometrii płaskiej z elektrolitem stałotlenkowym (SOFC). Warto podkreślić, że ogniwa paliwowe PEMFC pracujące w zakresie temperatur od ok. 120°C do ok. 160°C czy ogniwa paliwowe SOFC pracujące w temperaturach od ok. 600°C do ok. 800°C mogą być stosowane do układów trójgeneracyjnych, tj. do wytwarzania elektryczności, ciepła i chłodu (Ghassemi et al. 2020).

Na Rys. 1 przedstawiono układ CHP z ogniwoami paliwowymi typu PEMFC do badania zmian dystrybucji energii i ciepła.

We współczesnym projektowaniu domów jedno- i wielorodzinnych można zaobserwować zwiększenie zastosowania technologii pozwalających bazować na własnych odnawialnych źródłach energii. Integralnym elementem przydomowych jednostek OZE wytwarzających energię elektryczną są baterie elektrochemiczne pełniące funkcję krótkoterminowych magazynów energii elektrycznej. Obecnie poszukuje się sezonowych magazynów energii, które pozwoliłyby na zmagazynowanie energii pochodzącej z nadwyżek produkcji w okresie letnim i wykorzystanie jej w okresie zimowym. Wodór posiada właściwości, dzięki którym może pełnić taką funkcję. Nadwyżki energii elektrycznej pochodzące z OZE wykorzystywane są do elektrolitycznego wytwarzania wodoru, który następnie jest osuszany i sprężany do ciśnienia 300–350 barów. Zmagazynowany w ten sposób wodór jest przechowywany w zbiornikach o zróżnicowanej pojemności (ok. 50–100 dm<sup>3</sup>).



Rys. 1. Model układu CHP z ogniwami paliwowymi PEMFC do badań efektywności energetycznej. Stanowisko zbudowane na Wydziale Energetyki i Paliw AGH

W okresie jesienno-zimowym zmagazynowany zielony wodór jest wykorzystywany do zasilania ogniw paliwowych, które pełnią funkcję generatorów dla odbiorców energii elektrycznej w gospodarstwach domowych. Ważnym czynnikiem rozwojowym tej technologii może być wariantowe wykorzystanie ciepła odpadowego w ogrzewnictwie lub w wytwarzaniu chłodu (w tzw. układach trójgeneracyjnych). Baterie elektrochemiczne wykorzystywane są głównie do pokrycia deficytu energii elektrycznej. W projektach pilotażowych realizowanych w Niemczech, Szwajcarii, Japonii, Francji, Danii czy USA, dotyczących rozwoju samowystarczalnych domów jedno- bądź wielorodzinnych wykorzystujących technologie energetyki odnawialnej, uczestniczyli już przedstawiciele znanych firm produkujących ogniwa paliwowe (np. Proton Motor, Niemcy) (Dudek 2020).

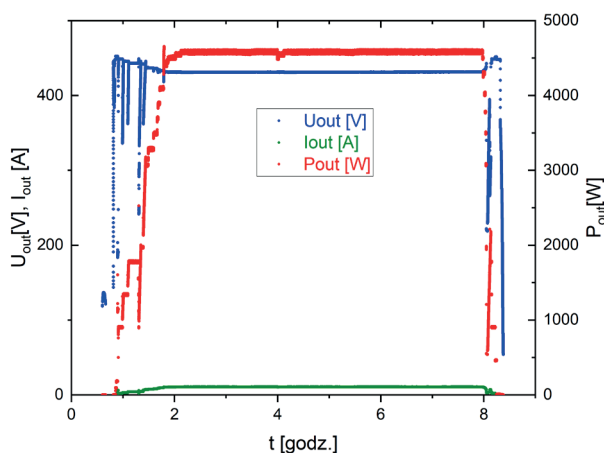
Kolejnymi możliwymi rozwiązaniami w zakresie magazynowania wodoru są układy niskociśnieniowe bazujące na technologii odwracalnych wodorków metali. Przykładem takiego rozwiązania jest propozycja

firmy Lavo z Australii. Ich skalowalny niskociśnieniowy magazyn wodoru może być łatwo modyfikowany przez dodawanie kolejnych niskociśnieniowych zbiorników wodoru. Atrakcyjna technologia znajdzie zastosowanie w różnych obszarach budownictwa.

Wykorzystanie alternatywnych paliw jako nośników wodoru w rozproszonych systemach zasilania wykorzystujących technologię ogniw paliwowych to obecnie ważny kierunek prac dotyczący wykorzystania wodoru. Kolejnym wariantem rozwoju zintegrowanych źródeł OZE, z magazynami energii w postaci baterii elektrochemicznych, może być stopniowe dodawanie do istniejących już systemów generatorów energii elektrycznej zawierających ogniwa paliwowe typu HT-PEMFC (*high temperature polymer fuel cells*). Ogniwa paliwowe HT-PEMFC pracują w temperaturze powyżej 100°C i mogą być bezpośrednio zasilane wodorem powstającym w procesie reformingu metanolu. Do produkcji 1 kWh energii elektrycznej zużywa się ok. 1 dm<sup>3</sup> wyjściowego roztworu wodnego metanolu.



Układy takie mogą stanowić pomocnicze źródła zasilania w energię elektryczną i ciepło. Ponadto istnieje możliwość ich łatwej integracji z magazynem energii elektrycznej pracującym zarówno w linii elektrycznej wysokiego napięcia, jak i w układzie niskonapięciowym. Ilustracją tego stanu jest Rys. 2, na którym przedstawiono zmiany parametrów elektrycznych na wyjściu z generatora energii elektrycznej, tj. napięcia ( $U_{out}$ ), natężenia prądu ( $I_{out}$ ) oraz mocy elektrycznej  $P_{out}$  w trakcie pracy generatora z ogniwami paliwowymi PEMFC.



Rys. 2. Zmiany parametrów elektrycznych na wyjściu z generatora energii elektrycznej, tj. napięcia ( $U_{out}$ ), natężenia prądu ( $I_{out}$ ) oraz mocy elektrycznej ( $P_{out}$ ) w trakcie pracy generatora z ogniwami paliwowymi PEMFC

## Podsumowanie

Na podstawie analiz zmian zachodzących w budownictwie oraz w sektorze energetycznym można stwierdzić, że integracja odnawialnych źródeł energii z technologiami wodorowymi może być jednym z czynników skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła w budynkach niskoenergetycznych czy pasywnych. Zintegrowanie wodoru jako magazynu i nośnika energii w układach skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła przyczynia się w znacznym stopniu do ograniczenia emisyjności  $CO_2$  w budownictwie. Interesującą alternatywą może być również wykorzystanie metanolu jako nośnika wodoru do budowy pomocniczych czy interwencyjnych systemów zasilania w budownictwie.

## Bibliografia:

- Dudek M. (2020), *Czy uda się stworzyć samowystarczalny energetycznie dom*, „Brawo Ty” 6: 75–77.
- Gałaszka M., Paruch J. (2008), *Odnawialne i niekonwencjonalne źródła energii*, Tarbonus, Kraków–Tarnobrzeg.
- Ghassemi M., Kamvar M., Steinberger-Wilckens R. (2020), *Fundamentals of Heat and Fluid Flow in High Temperature Fuel Cells*, Elsevier, Willey.
- Srinivasan S. (2006), *Fuel Cells: From Fundamentals to Applications*, Springer, New York.
- Yahyaoui I. (ed.) (2018a), *Advances in Renewable Energies and Power Technologies*, vol. 1: *Solar and Wind Energies*, Elsevier Science.
- Yahyaoui I. (ed.) (2018b), *Advances in Renewable Energies and Power Technologies*, vol. 2: *Biomass, Fuel Cells, Geothermal Energies, and Smart Grids*, Elsevier Science.

## Can hydrogen be a storage and carrier of energy in construction?

**Abstract:** The article describes the main options for using hydrogen as an energy storage and carrier, and for using fuel cells in distributed energy. It presents the possibilities of integrating hydrogen and fuel cell technology solutions with renewable energy sources in independent power systems for the building industry. Hydrogen produced by electrolysis can be stored in scalable high-pressure (200–350 bar) and low-pressure hydrogen storage tanks and then used to generate electricity from fuel cells. The use of alternative fuels (e.g. methanol) as hydrogen carriers for auxiliary power systems in building industry is also an interesting option. Another important feature of the distributed systems under consideration is the possibility of recovering and using waste heat, both from fuel cells and hydrogen processes.

**Keywords:** electricity, hydrogen, fuel cell, combined energy and heat production, methanol

Dr hab. inż. Magdalena Dudek, prof. AGH

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza  
Wydział Energetyki i Paliw

