

*Krzysztof Pytel, Henryk Noga, Marcin Białka*

## Technologia ogniw paliwowych i jej wkład w rozwój współczesnej techniki

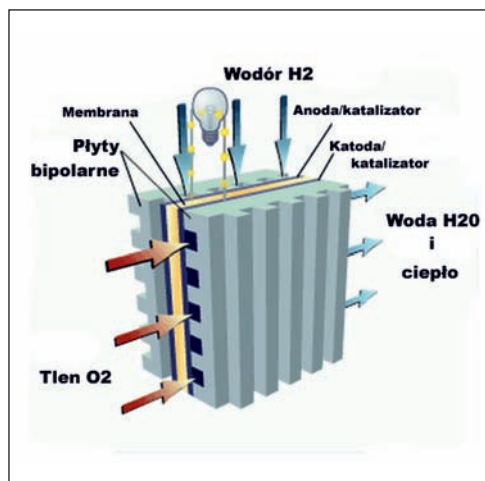
### Wprowadzenie

Ogniwa paliwowe to urządzenia, które bezpośrednio zamieniają energię chemiczną paliwa i utleniacza w energię elektryczną. Dzieje się to w procesach podobnych do spalania, ale zachodzących izotermicznie i bez płomienia. Charakteryzują się bezpieczną pracą, niską temperaturą eksploatacji, możliwością pracy rewersyjnej oraz sprawnością dochodzącą nawet do 80% (w przypadku ogniw typu PAFC).

Najprostszym typem ogniwa paliwowego jest ogniwo wodorowo-tlenowe, w którym wodór jest doprowadzony do anody, a tlen do katody. Katalizator na anodzie powoduje rozbitcie wodoru na protony (+) i elektrony (-). Elektrolit przepuszcza do katody jedynie protony. Elektrony przemieszają się do katody zewnętrznym obwodem, tworząc prąd elektryczny. Cząsteczka wodoru, łącząc się z molekułą tlenu, oddaje 242 kJ/mol  $H_2O$  energii i tworzy związek chemiczny zwany wodą ( $H_2O$ ), tzn. efekt końcowy to produkt ekologiczny – woda i energia powstała podczas reakcji.

Na rysunku 1 przedstawiono zasadę działania ogniwa paliwowego. Z jednej strony do anody jest doprowadzane paliwo (np. wodór), zaś z drugiej tlen pełniący rolę utleniacza doprowadzony jest do katody. Ogniwa paliwowe różnią się od siebie: materiałem elektrod, rodzajem elektrolitu i katalizatorem, a także – zakresem mocy, konstrukcją, temperaturą pracy. Klasyfikacje ogniw paliwowych można ustalić w zależności od wartości mocy wyprodukowanej, sposobu wykorzystania paliwa, temperatury pracy lub rodzaju zastosowanego elektrolitu. Jednym z najbardziej popularnych typów ogniw paliwowych są z polimerową membraną (PEMFC).

Do paliw zasilanych ogniwa paliwowe zaliczamy: wodór w postaci gazowej oraz metan. Wodór jest najczęściej występującym pierwiastkiem we wszechświecie i jednym z najczęściej spotykanych pierwiastków na ziemi (m.in. stanowi 16% atomowych w skorupie ziemskiej). Jest najlżejszym pierwiastkiem spośród wszystkich poznanych do tej pory, jego gęstość w stanie gazowym wynosi  $90 \text{ g/m}^3$ , a w stanie ciekłym  $70,8 \text{ kg/m}^3$ . W tabeli 1 zestawiono paliwa wykorzystywane w energetyce i ich parametry techniczne



Rys. 1. Konstrukcja ogniw paliwowych

Tab. 1. Dane porównawcze parametrów technicznych charakterystycznych dla danych paliw

Parametr	Wodór	Benzyna	Metan	Propan
Wartość opałowa, MJ/kg	120	44,4	50	46,4
Ciepło spalania, MJ/kg	141,9	46,7	55,5	48,9
Temperatura samozapłonu, °C	585	222	534	466

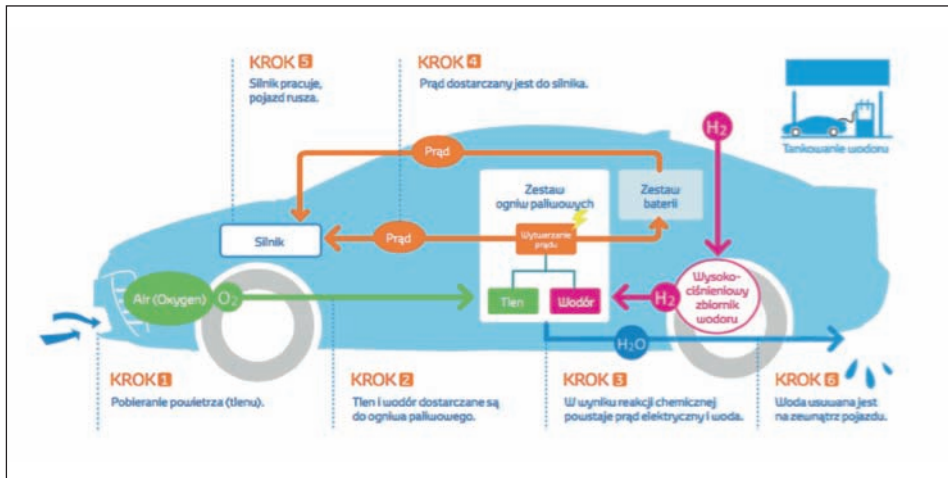
## Zastosowanie ogniw paliwowych

Możliwości zastosowania ogniw paliwowych m.in. obszar motoryzacji, telekomunikacji oraz systemów energetycznych. W przemyśle samochodowym na przestrzeni lat pojawiały się prototypy napędzane hybrydowo lub tylko i wyłącznie ogniwami paliwowymi (m.in. ogniwami polimerowymi). W transporcie miejskim od lat spekuluje się o zamianie autobusów z silnikami benzynowymi na bardziej proekologiczną alternatywę. Stosowanie w tych środkach transportu ogniw paliwowych znacznie poprawiło jakość powietrza (Lewandowski 2007).

Motoryzacja wiąże duże nadzieje z ogniwami paliwowymi. Początkowo sądzono, że największą rolę odegrają ogniwa polimerowe PEMFC zasilane czystym wodorem, jednak obecnie, kiedy duże znaczenie nabierają biopaliwa, wszystko wskazuje na to, że największe szanse mają ogniwa z wewnętrznym reformingiem lub zasilane bezpośrednio metanolem DMCF.

Pierwszym zaprezentowanym prototypem napędzanym systemem hybrydowym (ogniwo PEMFC i akumulator) był Green Car firmy Energy Partners inc. W 1993 r. ten dwuosobowy samochód sportowy o mocy 25,5 kW umożliwiał jazdę z maksymalną prędkością 96 km/h. Kolejne prototypy, Genesis i Gator, powstały w 1995 i 1996 r. (Jarzębska 2007).

Mercedes-Benz w ramach projektu NECAR (New Electric Car) skonstruował serię prototypów samochodów elektrycznych. Konstrukcja prototypów bazowała na samochodzie spalinowym dostawczym MB 100. Pierwszym prototypem z tej serii był Necar II" (Mini-Van) w 1996 r., wyposażony w układ napędowy o mocy 50 kW



Rys. 2. Zasada działania samochodów zasilanych wodorem

i zbiorniki wodoru o masie 800 kg umożliwiające 7 do 8 osobom jazdę z prędkością 110 km/h na odległość 250 km. Kolejna wersja samochodu elektrycznego została wyposażona w reformer metanolu. W tej wersji maksymalny zasięg wyniósł do 500 km przy zbiorniku metanolu o pojemności 50 dm<sup>3</sup> (Chmielniak 2017).

Prace nad konstrukcjami samochodów napędzanych wodorowym ogniwem paliwowym były prowadzone też przez koncerny Toyota, Renault, Peugeot, Van, Ford. Najbardziej interesującymi przykładami są obecnie produkowane seryjnie: Toyota Mirai i Hyundai ix35 Fuel Cell.

W 2017 r. sprzedano ponad 2,5 tys. aut Toyoty Mirai. Samochód produkowany seryjnie, którego układ zasilania oparty jest na ogniwach paliwowych i dwóch zbiornikach pozwalających na przejechanie dystansu około 550 km. Projekt rozwijany od 1992 r. na koncepcie FCV firmy Toyota Motor Corporation został zaprezentowany w 2007 r. na Tokyo Motor Show oraz w 2008 r. na Paris Motor Show. Produkcja seryjna na większą skalę została zapoczątkowana w 2014 r. Wielokrotnie nagradzany za swoją innowacyjność i wpływ na środowisko, w 2016 r. w Nowym Jorku otrzymał nagrodę „World Car of the Year” w kategorii World Green Car. Producent podkreśla wpływ samochodu na środowisko (zerowa emisja spalin) i możliwość pełnego napełnienia zbiorników na wodór w niespełna cztery minuty, co w przypadku samochodów elektrycznych jest jedynie niedoścignionym marzeniem. Samochód napędzany silnikiem elektrycznym o mocy 113 kW, co w przybliżeniu daje nam to 154 km i moment obrotowy 335 Nm, powoduje, że pojazd porusza się z maksymalną prędkości 180 km/h i w niecałe 10 sekund przyspiesza do 100 km/h. Czterookobowy sedan posiada dwa zbiorniki wysokociśnieniowe na sprężony wodór (do 70 Mpa) o łącznej pojemności 122,4 l, w przeliczeniu na pokonywany dystans daje to około 550 km. Układ zasilania, składający się z zespołu ogniw paliwowych typu PEMFC, to ogniwa polimerowe z membraną typu D, w której katoda jest z platyny, a anoda ze stopu platyny i rodu. Osiąga gęstość mocy na poziomie 3,1 kW/l, czyli ogniwa paliwowe wytwarzają z wodoru i tlenu prąd o mocy 114 kW oraz powstaje para wodna. Zespół ogniw paliwowych posiada własny wewnętrzny układ cyrkulujący odpowiedzialny za kontrolę ilości wody i właściwy poziom nawilżenia

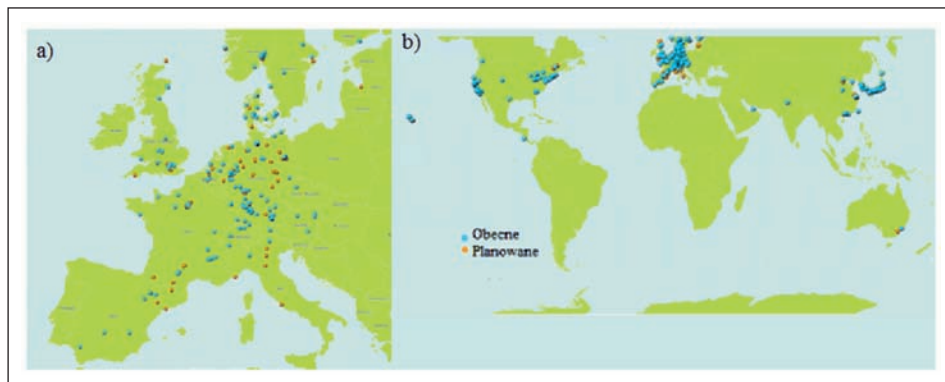
na powierzchni ogniwi. Cały system zasilania bazuje na akumulatorach niklowo-metalowo-wodorkowych w celu wspomaganie ogniwi paliwowych podczas przyspieszania, jak również stanowi miejsce na gromadzenie energii pozyskanej podczas hamowania. Za sterowanie zasilania silnika elektrycznego z ogniwi paliwowych i akumulatora oraz ładowaniem akumulatora energią odzyskaną podczas hamowania odpowiedzialny jest sterownik mocy. Ważnym elementem układu jest przetwornica napięcia podwyższająca napięcie uzyskane z ogniwi paliwowych do 650 V, co pozwoliło zredukować liczbę ogniwi i zmniejszyć rozmiar silnika elektrycznego.

Stosowanie w ekologicznych środkach transportu miejskiego ogniwa zmniejszają znacznie koszty eksploatacji. Autobusy napędzane wodorem działają na podobnej zasadzie jak samochody zasilane ogniwami paliwowymi seryjnie produkowanymi już od wielu lat. Fundusze Unii Europejskiej wspomagają wdrażanie nowoczesnych technologii w zakresie transportu publicznego. Autobusy elektryczne, hybrydowe, zasilane wodorem, wykorzystując ogniwa paliwowe do przekształcenia gazu na energię elektryczną, równocześnie nie zanieczyszczają środowiska. Jednym z pierwszych programów UE był program CUTE uruchomiony w 2001 r., który później ewoluował w HyFLEET:CUTE. W ramach tych projektów wprowadzono do transportu miejskiego 33 autobusy z ogniwami paliwowymi firmy Mercedes Citaro oraz MAN Lion's City H. Najwięcej, bo aż 56 autobusów zasilanych wodorowym ogniwem paliwowym, wyjechało na ulice w ramach projektu CHIC. Program High VLO City z 2012 r. umożliwił analizę działania autobusów Van Hool – 14 pojazdów kursuje po europejskich miastach. W Ameryce Północnej w 2013 r. jeździło łącznie 42 zeroemisyjnych autobusów zasilanych wodorem, 20 autobusów firmy New Flyer w Kanadzie (w Whistler), 13 autobusów firmy Van Hool w San Francisco, 4 pojazdy typu Eldorado w Thousand Palms w Kalifornii, a także po 1 w takich miastach jak Birmingham, Flint, Newark i New Heaven. Autobusy zasilane ogniwami paliwowymi coraz częściej pojawiają się na ulicach Europy, m.in. w Londynie, Oslo, Mediolanie, Berlinie, Kolonii czy Hamburgu.

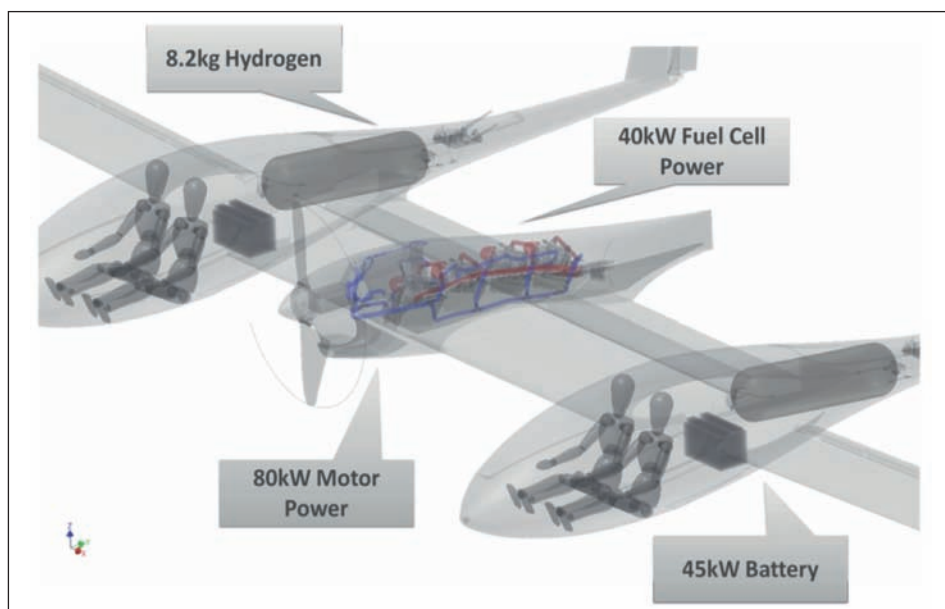
Autobus zasilany ogniwami paliwowymi standardowo składa się z pakietu ogniwi paliwowych. Energia jest przekazywana do akumulatora. Za całość odpowiada system zarządzania energią. Wodór zmagazynowany jest w zestawie butli wysokociśnieniowych. Do ogniwi doprowadzane jest powietrze za pomocą sprężarki. Pojazd napędzany jest za pomocą asynchronicznych silników elektrycznych.

Wdrożenie programu autobusów napędzanych wodorem może stać się silnym bodźcem dla rozwoju gospodarki. Jednakże brakuje odpowiedniej infrastruktury ładowania wodorem w Polsce i na całym świecie. W Europie jest zaledwie 89 stacji wodorowych (w planach jest kolejnych 54, większość w Niemczech – rok 2018), a na całym świecie 184 (w planach 129 kolejnych – rok 2018). W Polsce nie ma żadnej, ale planuje się do 2030 r. powstanie 10. Koszty wybudowania takiej stacji wodorowej są wielokrotnie wyższe niż tradycyjnej stacji, sięgają 2 milionów euro.

Polska i kraje Europy Południowo-Wschodniej są ważnym elementem infrastruktury transportu publicznego w Europie. Obecnie Grupa LOTOS S.A. planuje wybudowanie stacji tankowania wodoru w Gdańsku i Warszawie. Gdańska rafineria Grupy LOTOS S.A. obecnie produkuje około 13 t/h wodoru, a po zakończeniu budowy Projektu EFRA przewidywana wydajność wzrośnie do 16,5 t/h. Realizacja projektu EFRA oznacza więcej cennych produktów wyprodukowanych z każdej baryłki ropy w gdańskiej rafinerii. Efektywniej zagospodarowane będą ciężkie



Rys. 3. Lokalizacja stacji ładowania wodorem w Europie (a) i na świecie (b) w 2018 r.



Rys. 4. Konstrukcja samolotu firmy HY4

pozostałości z procesu rafinacji. Autobus zasilany ogniwami paliwowymi zużywa w ciągu roku taką ilość wodoru, jaką instalacje Grupy LOTOS S.A. produkują w ciągu jednej godziny.

Samoloty napędzane energią pozyskaną z reakcji chemicznej zachodzącej w ogniwach paliwowych to technologia wykorzystania ogniw paliwowych, która nie została jeszcze wprowadzona do produkcji seryjnej statków powietrznych. Pojawiło się kilka prototypów małych samolotów pasażerskich i małych dolnopłatów załogowych lub bezzałogowych, jednakże powszechnie nie inwestuje się w technologię opartą o zasilanie bazujące na ogniwach paliwowych. Jednym z przykładów takiej działalności jest czteroosobowy samolot pasażerski HY4 zasilany ogniwami paliwowymi. Samolot został skonstruowany między innymi przez Niemiecką Agencję Kosmiczną. W 2016 r. prototyp odbył pierwszy 15-minutowy lot z pasażerami.

Planowane jest pokonanie dystansu do około 1500 km. Jet to samolot jednosilnikowy charakteryzujący się bezemisyjną pracą i dwukadłubową konstrukcją mieszczącą po dwóch pasażerów. HY4 nie należy do dużych samolotów pasażerskich, jego rozpiętość skrzydeł wynosi 21,36 m, długość załedwie 7,4 m, maksymalna masa to 1500 kg.

Samolot napędzany jest silnikiem elektrycznym (silnik synchroniczny z magnesami trwałymi) o mocy 80 kW i jest w stanie lecieć z maksymalną prędkością 200 km/h, prędkość przelotowa maszyny wynosi 145 km/h. Do rozpoczęcia lotu dwa silniki wykorzystują prąd pobrany z akumulatora litowo-polimerowego. W zależności od prędkości, wysokości i obciążenia może osiągnąć zasięg do 1500 km. Za układ zasilania jest odpowiedzialny zespół 440 ogniw polimerowych (ogniwo z polimerową membraną – PEMFC). Ogniwo to należy do grupy ogniw niskotemperaturowych i jego sprawność dochodzi do 60%. Moc nominalna osiągana przez zespół ogniw wynosi 45 kW. Ogniwo paliwowe bezpośrednio zamienia wodór zmagazynowany w zbiornikach i tlen pozyskany z powietrza na energię elektryczną zasilającą silnik elektryczny podczas lotu. Energia pozyskana z ogniwa polimerowego jest magazynowana w akumulatorze litowo-polimerowym o pojemności 21 kWh zbudowanym z 80 osobnych ogniw i nominalnej mocy 45 kW i maksymalnym prądzie 600 A. Wodór zmagazynowany jest w kadłubach na obydwu skrzydłach w zbiornikach wysokociśnieniowych (437 bar) o pojemności łącznej 18 kg wodoru i wadze 170 kg. System doprowadzania wodoru w bezpośredni sposób łączy zbiorniki z gazem do ogniw paliwowych za pomocą przepustnicy elektromagnetycznej zainstalowanej przy zaworze butli.

Jednym z najbardziej medialnych prototypów był samolot Helios zbudowany przez amerykańską firmę technologiczną AeroVironment, Inc. (rys. 5). W ramach programu ERAST został zbudowany celem zdefiniowania technologii umożliwiającej samolotom bezzałogowym długotrwały przelot w celu wykonania zadań badawczych. Może pełnić rolę satelity atmosferycznego lub służyć jako platforma komunikacyjna. Samolot latał w latach 1999–2003. Helios był bezzałogową jednostką latająca zasilaną hybrydowo, energią słoneczną z paneli fotowoltaicznych i ogniwami



Rys. 5. Samolot Helios firmy AeroVironment, Inc

paliwowymi (które pracowały w ciągu nocy). W podobnej technologii zostały wykonane pojazdy latające NASA Pathfinder i NASA Pathfinder Plus.

Technologia ogniw paliwowych cieszy się ogromnym zainteresowaniem w przemyśle energetycznym. Ze względu na wielką różnorodność ogniw paliwowych, możliwości ich zastosowania są szerokie. Obecnie istnieje cały szereg aplikacji, w których wykorzystano ten rodzaj źródła energii. Począwszy od stacjonarnych systemów zasilania w szpitalach, hotelach, biurach, szkołach, elektrowniach miejskich, a mobilnych jednostkach małej mocy w laptopach, telefonach komórkowych i układach zasilania w pojazdach. Oprócz mobilnych jednostek energetycznych, znajdujących zastosowanie w przypadku awarii, klęsk żywiołowych i katastrof, pojawiły się nowe koncepcje zastosowania ogniw paliwowych w takich systemach, jak: rozproszona generacja energii, systemy kogeneracyjne z wykorzystaniem wielu odnawialnych źródeł energii, w tym też pomp ciepła i inne. Współpraca ogniw paliwowych z ogniwami słonecznymi w układach hybrydowych pozwala wyeliminować najważniejszą wadę tych ostatnich, a mianowicie – dobową cykliczność ich pracy. Dotychczasowe magazynowanie energii w akumulatorach było drogie. Testy uwzględniające zastosowanie systemu hybrydowego, składającego się z ogniw paliwowych o mocy 1 kW i ogniw fotowoltaicznych o tej samej mocy, przeprowadzone 2002 roku w Bend (USA) przez IdaTech Company, wypadły wysoko obiecująco. Kolejne z serii 35 badań systemów o mocy 10 kW wykazały około 10% wzrost sprawności i około 50% oszczędność paliwa w porównaniu z układem ogniwo fotowoltaiczne – generator napędzany silnikiem spalinowym. Ponadto ogniwa pracowały bez nadzoru ponad kilka tysięcy godzin, a generator i silnik po 250–500 h wymagały serwisowania (smarowanie, wymiana oleju itd.).

Jednym z rozwiązań, w którym zastosowano ogniwa paliwowe, jest projekt domu słonecznego we Frynburgu (Niemcy), w którym funkcje sieci energetycznej i gazowej pełni helioelektrownia uzupełniana o akumulatory ołowiane. Po naładowaniu akumulatorów zostaje przeprowadzony elektrolityczny rozkład wody w celu uzyskania wodoru, który pełni funkcję magazynu energii. W miesiącach zimowych wodór wykorzystywany jest jako uzupełniające źródło energii dzięki przemianie elektrochemicznej w ogniwach paliwowych.

## Podsumowanie

Istnieje wiele potencjalnych zastosowań technologii wykorzystujących ogniwa paliwowe, począwszy od roli źródła zasilania w telekomunikacji, zasilania pomocniczego w energetyce, po źródła energii w pojazdach samochodowych oraz statkach powietrznych. Jest to jedna z najlepszych alternatyw dla kończących się paliw kopalnych, technologia przyjazna środowisku, zeroemisyjna.

Zalety pojazdów zasilanych ogniwami paliwowymi to szybkie tankowanie i natychmiastowa gotowość do użytkowania. Proces tankowania jest niezwykle podobny do tankowania zbiornika na instalacje LPG i trwa zaledwie kilka minut. Podstawowa wada to dostępność punktów tankowania wodoru oraz jeszcze wysoka cena zakupu pojazdu (około 60 tys. dolarów za nowy model w 2018 r).

Technologia wykorzystująca ogniwa paliwowe niesie za sobą wiele możliwości i korzyści. Może być zastosowana w energetyce (np. elektrownie, awaryjne systemy

zasilania), w wysokowydajnych pojazdach samochodowych przekraczających dystans 700 km oraz samolotach pasażerskich osiągających dystans 1500 km. Są też wady wynikające z trwałości ogniwa paliwowego, która jest wysoka, ale pod warunkiem stosowania odpowiednio czystego paliwa. Uszkodzenie bądź zanieczyszczenie ogniwa generuje koszt znacznie większy niż w przypadku współczesnych tradycyjnych technologii. W konsekwencji skutkuje to niewielkim zainteresowaniem na rynku konsumenckim, znikomą produkcją oraz wysoką ceną.

### **Bibliografia**

- Chmielniak T.J., 2004. *Technologie energetyczne*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- Chmielniak T.J., 2017. *Ogniwa paliwowe w układach energetycznych małej mocy*. Kogeneracja w energetyce przemysłowej i komunalnej, Gliwice.
- Jastrzębska G., 2007. *Odnawialne źródła energii i pojazdy proekologiczne*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- Lewandowski W.M., 2007. *Proekologiczne odnawialne źródła energii*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne Warszawa.

### **Fuel cell technology and its contribution to development modern technology**

#### **Abstract**

The article presents fuel cell technology and possibilities that lie behind the invention belonging to the group of energy generators. The nature of their operation, examples of projects and properties that make them stand out from other technical devices are presented. It was pointed out how the 21st century obliges to the development of technology and innovative technologies. Well-known resources, fossil resources, oil and natural gas fields are running low, which is why the potential behind fuel cells is presented. Their versatility in application in selected areas of life was described, as well as their use in innovative international projects.

**Key words:** Fuel cells, technology, modern technologies

Krzysztof Pytel  
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie  
al. Mickiewicza 30  
30-059 Kraków

Henryk Noga  
Uniwersytet Pedagogiczny im. Komisji Edukacji Narodowej w Krakowie  
ul. Podchorążych 2  
30-084 Kraków

Marcin Białka  
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie  
al. Mickiewicza 30  
30-059 Kraków