
Alicja Bednarek*, Maksymilian Zarychta, Rafał Czompelik*****

BADANIE WPŁYWU WARUNKÓW ŚRODOWISKOWYCH NA PARAMETRY PRACY WODOROWEGO OGNIWA PALIWOWEGO PEM

W pracy przedstawiono wyniki analizy wpływu warunków środowiskowych na parametry pracy ogniwa paliwowego PEM zastosowanego w prototypowym pojeździe HYDRIVE. Zakres badań obejmował analizę parametrów pracy układu w warunkach dostarczenia dodatkowego chłodzenia sprężonym powietrzem, w warunkach zwiększonej wilgotności bezpośredniego otoczenia ogniwa oraz w przypadku odłączonego zaworu przedmuchiwania wodorem. Otrzymane wyniki wskazują na występowanie istotnych zmian sprawności badanego ogniwa paliwowego, w tym jej spadek o 5% względem wcześniejszych testów. Zidentyfikowano potrzebę optymalizacji zużycia wodoru oraz możliwość modernizacji systemu, która zwiększy sprawność układu, a tym samym przyczyni się do uzyskania poprawy osiągnięć bolidu.

RESEARCH ON THE IMPACT OF ENVIRONMENTAL CONDITIONS ON THE OPERATING PARAMETERS OF A PEM HYDROGEN FUEL CELL

The study presents the results of an analysis of the impact of environmental conditions on the performance parameters of a PEM fuel cell used in the prototype HYDRIVE vehicle. The scope of the research included an evaluation of the system's performance under additional cooling with compressed air, increased ambient humidity around the fuel cell, and the disconnection of the hydrogen purging valve. The obtained results indicate significant changes in the efficiency of the tested fuel cell, including a 5% decrease compared to previous tests. The study identified the need for hydrogen consumption optimization and the potential for system modernization, which could enhance efficiency and contribute to improved vehicle performance.

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, Koło Naukowe Konstruktorów MechatykiCAD.

** AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Koło Naukowe Konstruktorów MechatykiCAD.

*** AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw, Koło Naukowe Konstruktorów MechatykiCAD.

1. WSTĘP

W obliczu zmian klimatycznych oraz konieczności redukcji emisji gazów cieplarnianych zadaniem naukowców i inżynierów jest między innymi poszukiwanie alternatywnych źródeł energii. Jednym z istotnych kierunków badań staje się również opracowywanie wysokoefektywnych i niskoemisyjnych rozwiązań w dziedzinie transportu. W tym kontekście członkowie Koła Naukowego Konstruktorów MechaCAD prowadzą badania nad zastosowaniem ogniwa paliwowego wykorzystującego wodór jako nośnik energii. Rysunek 1 ukazuje pojazd przygotowywany na przestrzeni lat przez członków Koła Naukowego podczas przejazdu na torze.



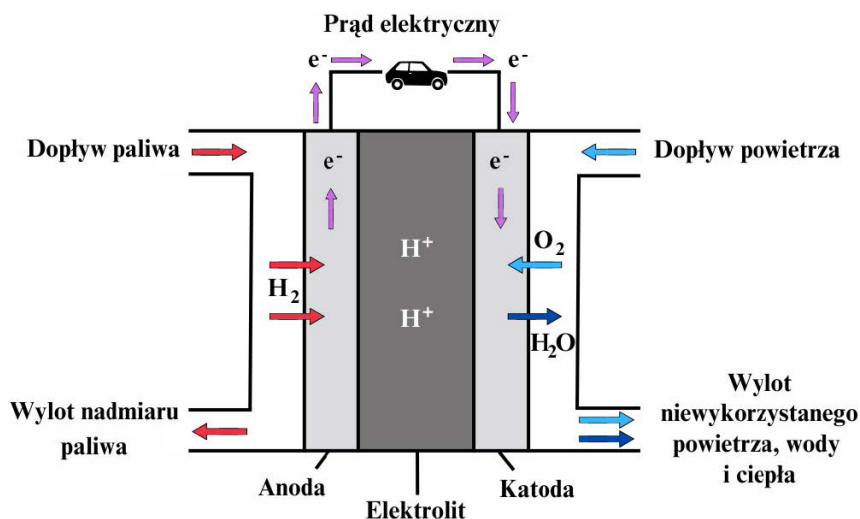
Rys. 1. Bolid HYDRIVE napędzany ogniwem wodorowym [1]

Zasada funkcjonowania ogniwa wodorowego polega na rozpadzie cząsteczek wodoru w anodzie na elektrony i protony. Protony migrują przez membranę do katody, na której łączą się z tlenem z powietrza, co prowadzi do powstania wody i wydzielania ciepła. Elektrony, nie mogąc przejść przez membranę, przemieszczają się przez zewnętrzny obwód i generują prąd elektryczny. Kontrolowany przepływ elektronów i protonów w ogniwie paliwowym umożliwia konwersję energii chemicznej na energię elektryczną. Proces uzyskania energii elektrycznej z wodoru został przedstawiony na rysunku 2 [2].

Zastosowanie wodoru w ogniwach paliwowych PEM (*Proton-Exchange Membrane*) stało się jednym z kluczowych rozwiązań umożliwiających skuteczne przejście od paliw kopalnych do zrównoważonych źródeł energii [3]. Koło Naukowe Konstruktorów MechaCAD aktywnie działa na rzecz rozwoju zrównoważonego transportu. Realizując badania i pracując nad projektem, zespół dąży do udoskonalania nowoczesnych technologii napędowych i zwiększenia ich efektywności.

Głównym celem podjętych badań było zidentyfikowanie możliwości zwiększenia wydajności ogniwa paliwowego PEM. Wysoka sprawność ogniw paliwowych jest niezbędna w kontekście udziału bolidu HYDRIVE w międzynarodowych zawodach Shell Eco-marathon promujących innowacyjne i energooszczędne rozwiązania mobilne. W związku z tym wskazano na

potrzebę zbadania wpływu warunków środowiskowych na parametry pracy ogniwa, w tym zwiększonej wilgotności powietrza dostarczonego do ogniwa, dodatkowego chłodzenia sprężonym powietrzem oraz ograniczonego dopływu wodoru. Członkowie koła MechaNICAD już wcześniej prowadzili badania nad wpływem tych czynników, co pozwoliło na zgromadzenie istotnych danych dotyczących optymalizacji pracy ogniwa.



Rys. 2. Schemat przedstawiający przemianę wodoru w energię elektryczną PEM [2]

Utrzymanie optymalnej temperatury jest istotne dla długotrwałej i efektywnej pracy ogniwa. Ma ona kluczowy wpływ na jego wydajność, ponieważ niższe temperatury zmniejszają ryzyko zużycia membran oraz występowania tzw. przedmuchów, które mogą prowadzić do uszkodzenia ogniwa. Membrana w ogniwie PEM jest szczególnie wrażliwa na wysokie temperatury, które mogą przyspieszać jej degradację.

Zawór upustowy odgrywa ważną rolę w układzie wodorowym, ponieważ umożliwia pozbycie się nadmiaru wody oraz zanieczyszczeń powstałych w czasie pracy ogniwa. Nadmiar wody może prowadzić do zbyt dużego przesylenia membrany, co negatywnie wpływa na ogólną wydajność ogniwa. Zastosowanie zaworu upustowego umożliwia utrzymanie optymalnych warunków jego pracy.

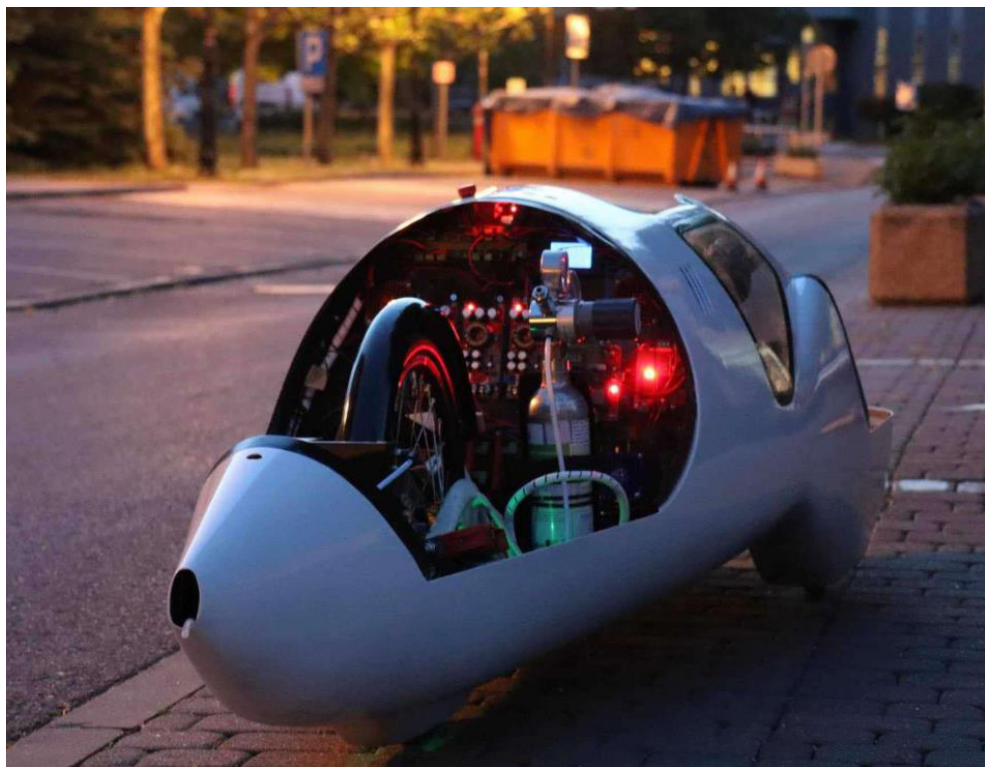
Wilgotność powietrza dostarczanego również ma znaczący wpływ na warunki pracy ogniw paliwowych. Zbyt niska może prowadzić do wysychania membrany, a zbyt wysoka – do nadmiernego gromadzenia się wody na membranie.

Przedstawione w artykule wyniki badań obejmują ocenę wpływu wyżej wymienionych czynników na funkcjonowanie ogniwa. Działania Koła Naukowego Konstruktorów MechaNICAD koncentrują się na zwiększeniu sprawności niskotemperaturowego ogniwa wodorowego PEM. Usprawnienia zostały przeprowadzone w wyniku modyfikacji układu doprowadzenia wodoru oraz warunków środowiskowych wokół ogniwa.

2. CEL PRACY

Celem pracy jest przedstawienie wyników badań wpływu zmiany warunków środowiskowych oraz modyfikacji układu doprowadzenia wodoru na parametry pracy niskotemperaturowego ogniwa paliwowego PEM. Przeprowadzone eksperymenty miały na celu ocenę zmian w wydajności i stabilności pracy ogniwa w zmiennych warunkach operacyjnych. Przeanalizowano efekty: zablokowania zaworu upustowego (purge), zastosowania zwiększonego ciśnienia powietrza dostarczonego do ogniwa w celu usprawnienia reakcji chemicznej oraz zwiększenia wilgotności powietrza dostarczonego do ogniwa.

Rysunek 3 przedstawia pojazd Hydrive, który został przygotowany do testowych przejazdów. Przedmiotem analiz jest ogniwo paliwowe PEM zastosowane w pojeździe HYDRIVE. Wykorzystano ogniwo wodorowe H-500 XP Fuel Cell marki Horizon o mocy 500 W [4]. Jest to niskotemperaturowe ogniwo paliwowe, które charakteryzuje się wysoką sprawnością energetyczną i kompaktową konstrukcją, co czyni je idealnym rozwiązaniem do zastosowań w małych pojazdach. Ogniwo to wykorzystuje membranę polimerową (PEM) do przewodzenia protonów, co umożliwia efektywną konwersję energii chemicznej wodoru na energię elektryczną.



Rys. 3. Zdjęcie układu doprowadzenia wodoru w bolidzie HYDRIVE [1]

3. METODYKA BADAŃ

Wpływ warunków środowiskowych na parametry pracy wodorowego ogniwa paliwowego PEM badano w serii trzech eksperymentów. Ich celem było przeprowadzenie analizy zmian wydajności ogniwa oraz zużycia wodoru w różnych warunkach eksploatacyjnych.

Wariant (a): badanie wpływu zmiany wilgotności dostarczonego powietrza na sprawność ogniwa

Badania przeprowadzono przy użyciu prototypowej dyszy, która umożliwiła zwiększenie wilgotności dostarczonego powietrza. Badanie miało na celu określenie możliwości kontroli sprawności układu przez sterowanie wilgotnością. Eksperyment miał nie tylko zidentyfikować wpływ tych czynników na sprawność ogniwa, ale także posłużyć opracowaniu rozwiązań optymalizacyjnych, które mogłyby przyczynić się do zwiększenia wydajności układu. Wyniki tych analiz mają istotne znaczenie dla dalszego rozwoju technologii wodorowych, szczególnie w kontekście ich zastosowania w transporcie, gdzie wymagana jest wysoka niezawodność i efektywność energetyczna.

Wariant (b): ocena wpływu dostarczenia do ogniwa powietrza pod zwiększonym ciśnieniem na sprawność ogniwa

Doprowadzenie do ogniwa sprężonego powietrza skutkowało wzbogaceniem mieszanki gazów zasilających ogniwo, ponadto rozprężanie gazu powodowało dodatkowe chłodzenie membrany ogniwa. Co więcej, chłodzenie sprężonym powietrzem wprowadzono w celu poprawy stabilności termicznej układu, kluczowej dla utrzymania optymalnych warunków pracy ogniwa.

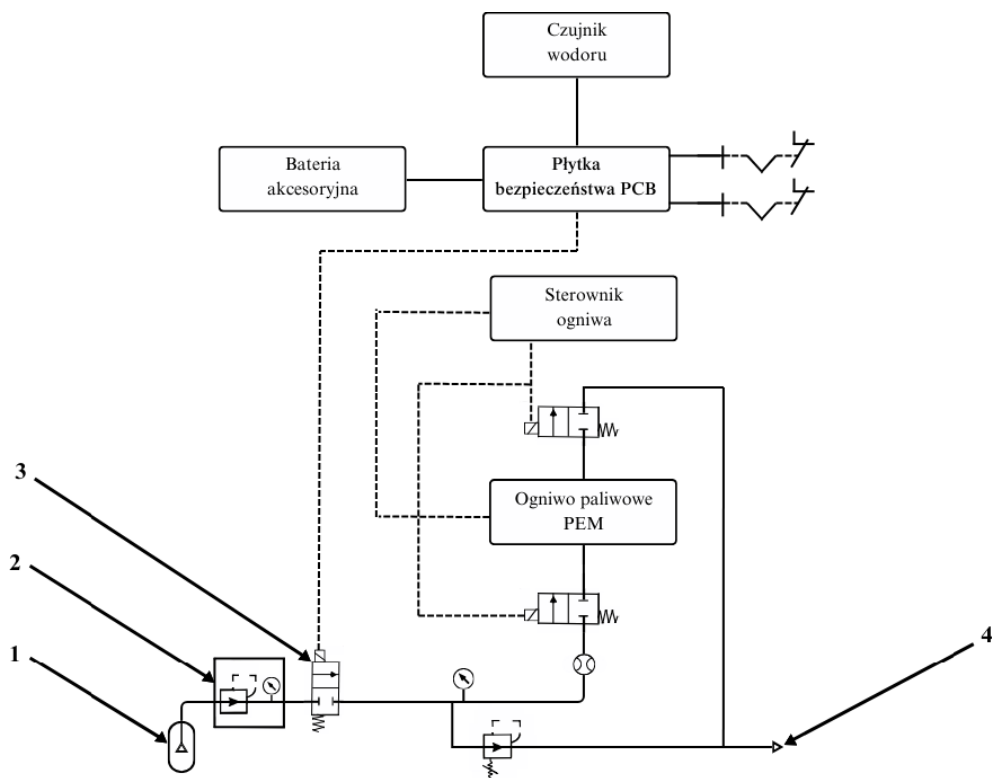
Wariant (c): ocena wpływu odłączenia zaworu upustowego na sprawność ogniwa

W ramach badań podjęto decyzję o odcięciu zaworu upustowego (4) (zob. rys. 4), co pozwoliło na wyeliminowanie zjawiska przedmuchów ogniwa. Celem badania było przeprowadzenie oceny parametrów pracy ogniwa przy ograniczonej liczbie przedmuchów.

Schematy układów doprowadzenia wodoru

Na rysunkach 4 oraz 5 przedstawiono schematy układów doprowadzających wodór, które zostały zastosowane podczas badań.

Na rysunku 4 przedstawiono schemat układu doprowadzenia wodoru w jego podstawowej wersji. Wodór jest dostarczany z zasobnika (1) do układu przez reduktor (2), który reguluje ciśnienie gazu do wartości optymalnych dla pracy ogniwa. Następnie wodór przepływa przez czujniki ciśnienia (3), które monitorują stan układu, zapewniając bezpieczeństwo i kontrolę procesu. W przypadku wykrycia nieprawidłowości układ bezpieczeństwa może automatycznie odciąć dopływ wodoru. Wodór trafia do ogniwa paliwowego, gdzie zachodzi reakcja elektrochemiczna, generująca energię elektryczną. Nadmiar wodoru oraz para wodna są usuwane z układu przez zawór upustowy (4), co zapobiega gromadzeniu się niepożądanych substancji w systemie.

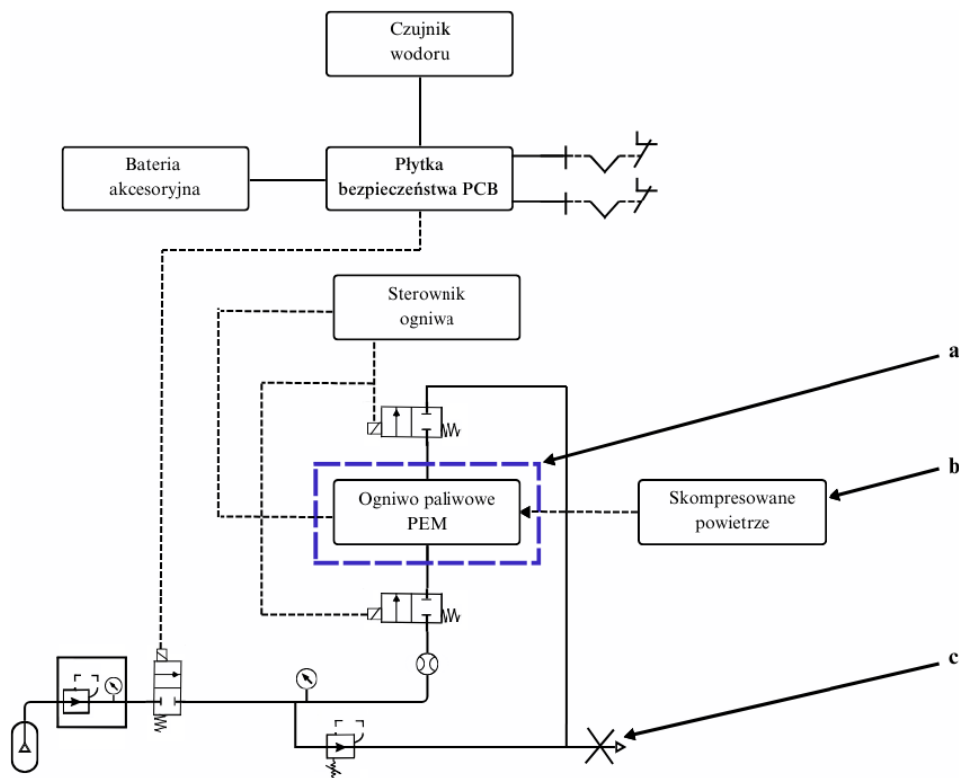


Rys. 4. Schemat układu doprowadzenia wodoru bez modyfikacji. Objasnienia w tekście

W tabeli 1 przedstawiono warianty modyfikacji układu doprowadzenia wodoru oznaczone na schemacie (rys. 5). Wariant (a) odnosi się do zwiększenia wilgotności powietrza dostarczonego do ogniwa. Ta modyfikacja ma na celu zbadanie, jak zmiana wilgotności wpływa na efektywność i stabilność pracy ogniwa. Wariant (b) wskazuje na zastosowanie sprężonego powietrza, które jest używane do wspomagania procesów w ogniwie paliwowym, szczególnie w celu poprawy wymiany gazowej i usprawnienia reakcji chemicznych zachodzących w ogniwie. Ta modyfikacja może wpłynąć na zwiększenie wydajności ogniwa. Wariant (c) dotyczy zablokowania zaworu upustowego. Ta modyfikacja ma na celu ukazanie, czy zablokowanie zaworu spowoduje zmniejszenie zużycia wodoru w trakcie jazdy bolidu.

Tabela 1. Modyfikacje układu doprowadzenia wodoru przedstawione na rysunku 5

Wariant	Modyfikacja
(a)	zwiększenie wilgotności powietrza dostarczonego do ogniwa
(b)	zastosowanie sprężonego powietrza
(c)	zablokowanie zaworu upustowego



Rys. 5. Schemat układu doprowadzenia wodoru z modyfikacjami

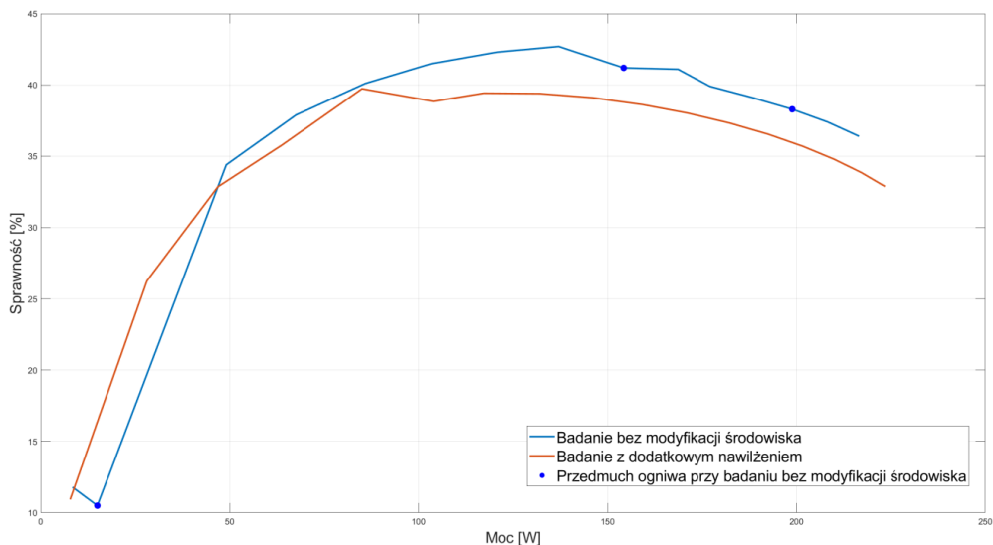
4. WYNIKI BADAŃ

4.1. WYNIKI BADAŃ WPŁYWU ZWIĘKSZONEJ WILGOTNOŚCI POWIETRZA DOSTARCZANEGO DO OGNIWA NA JEGO SPRAWNOŚĆ

Pierwszy etap badań obejmował analizę wpływu podwyższonej wilgotności środowiska wokół ogniwa paliwowego na jego wydajność, stabilność pracy oraz zużycie wodoru. W tym celu zastosowano specjalnie przygotowaną dyszę, która została nawilżona od wewnątrz wodą destylowaną, co umożliwiło stopniowe zwiększenie wilgotności w pobliżu membran ogniwa. Założeniem tego testu było określenie, czy wzrost wilgotności prowadzi do obniżenia sprawności systemu.

Przeprowadzone badania dostarczyły istotnych informacji na temat wpływu warunków środowiskowych na pracę wodorowego ogniwa paliwowego PEM, co może stanowić podstawę do optymalizacji systemów zasilania w pojazdach wykorzystujących tę technologię.

Na rysunku 6 przedstawiono wykres zależności sprawności ogniwa paliwowego od mocy dla dwóch wariantów badawczych: bez modyfikacji środowiska oraz z dodatkowym nawilżeniem. Krzywe pokazują, jak zmienia się sprawność ogniwa w zależności od mocy, a zaznaczone punkty odnoszą się do przedmuchów ogniwa w warunkach bez modyfikacji środowiska.



Rys. 6. Porównanie wyników uzyskanych w badaniach sprawności ogniwa w dwóch wariantach: bez modyfikacji środowiska oraz z dodatkowym nawilżeniem

W przypadku zwiększenia wilgotności powietrza dostarczanego do ogniwa uzyskano wzrost sprawności (niskie moce obciążenia). Należy również zwrócić uwagę, że w tym badaniu nie zanotowano przedmuchów dla powietrza o zwiększonej wilgotności. Tabela 2 przedstawia przykładowe wyniki badań sprawności ogniwa wodorowego, z uwzględnieniem parametrów elektrycznych oraz mierzonego przepływu wodoru. Dane te pozwalają na ocenę efektywności pracy ogniwa w różnych warunkach obciążenia oraz określenie rzeczywistego zużycia paliwa w zależności od generowanej mocy.

Tabela 2. Przykładowe wyniki badań sprawności ogniwa wodorowego

I_{ST} [A]	U_{FC} [V]	P_{FC} [W]	I_{FC} [A]	I_{PW} [A]	P_{PW} [W]	P_{NET} [W]	Eff [%]	Przepływ [ln/min]
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	21,5	21,5	2,1	1,1	14,3	7,2	10,06	0,4
2	19,6	39,2	3,1	1,1	14,3	24,9	23,26	0,6
3	18,9	56,7	4,1	1,1	14,3	42,4	29,71	0,8
4	18,4	73,6	5,1	1,1	14,3	59,3	33,24	1,0
5	18,5	92,6	6,2	1,2	15,6	77,0	35,97	1,2
6	18,5	111,0	7,1	1,1	14,3	96,7	38,72	1,4

Tabela 2 cd.

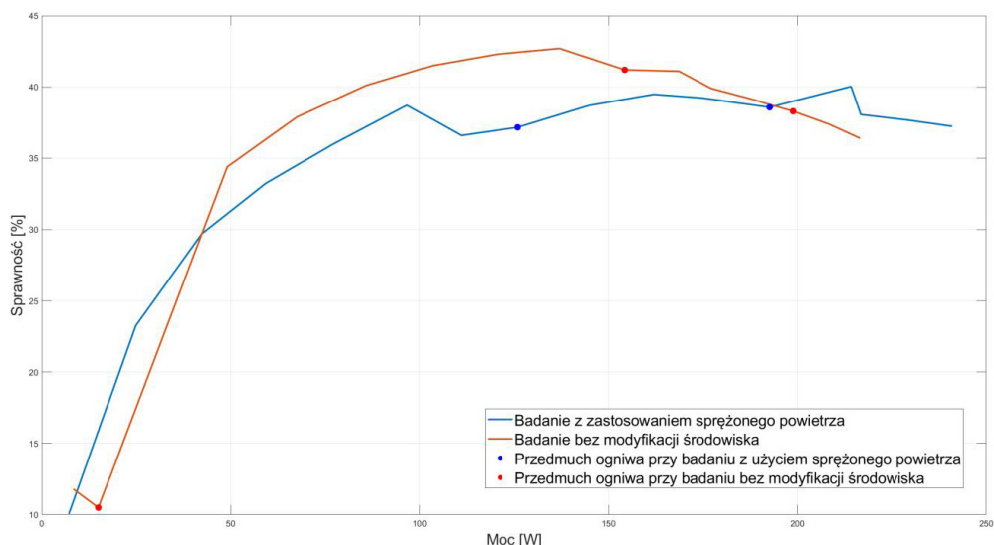
7	17,9	125,3	8,1	1,1	14,3	111,0	36,60	1,7
8	17,7	141,6	9,2	1,2	15,6	126,0	37,17	1,9
9	17,7	159,3	10,1	1,1	14,3	145,0	38,71	2,1
10	17,6	176,3	11,1	1,1	14,3	162,0	39,48	2,3
11	17,2	189,2	12,1	1,1	14,3	174,9	39,22	2,5
12	17,3	207,0	13,1	1,1	14,3	192,7	38,58	2,8
13	16,7	216,8	13,2	0,2	2,6	214,2	40,03	3,0
14	16,3	227,7	14,8	0,8	10,9	216,8	38,07	3,2
15	16	239,6	15,8	0,8	10,5	229,2	37,68	3,4
16	15,7	251,0	16,8	0,8	10,1	241,0	37,24	3,6

objaśnienia: I_{ST} – natężenie zadawane na obciążeniu, sterujące pracą ogniwa [A], U_{FC} – mierzone napięcie ogniwa wodorowego [V], P_{FC} – moc brutto wytwarzana przez ogniwo wodorowe [W], I_{FC} – mierzone natężenie ogniwa wodorowego [A], I_{PW} – mierzone natężenie potrzeb własnych na podtrzymanie funkcjonowania ogniwa [A], P_{PW} – moc potrzeb własnych na podtrzymanie funkcjonowania ogniwa [W], P_{NET} – moc netto wytwarzana przez ogniwo wodorowe [W]; $P_{NET} = P_{FC} - P_{PW}$ [W]

4.2. WYNIKI BADAŃ WPŁYWU CHŁODZENIA OGNIWA SPRĘŻONYM POWIETRZEM NA JEGO SPRAWNOŚĆ

Drugi typ badań dotyczył oceny efektu chłodzenia ogniwa paliwowego strumieniem sprężonego powietrza. Eksperyment przeprowadzono w warunkach stopniowego zwiększania obciążenia układu, przy jednoczesnym wykorzystaniu dodatkowego układu dostarczającego powietrze do ogniwa. Założeniem testu było sprawdzenie, czy intensyfikacja chłodzenia wpłynie na poprawę sprawności konwersji energetycznej oraz stabilność pracy ogniwa w warunkach dynamicznej eksploatacji.

Na rysunku 7 przedstawiono charakterystyki funkcji mocy obciążenia ogniwa. Badanie wykonano bez modyfikacji oraz z zastosowaniem sprężonego powietrza. W zakresie niskich mocy obciążenia wyższe sprawności uzyskano dla układu zmodyfikowanego. Jednak powyżej mocy obciążenia (powyżej 50 W) układ ten charakteryzował się nieco niższą sprawnością. Należy podkreślić, że w zakresie dużych mocy obciążenia (powyżej 200 W) widoczny jest korzystny wpływ dostarczenia powietrza o zwiększonym ciśnieniu. Punkty na wykresie obrazują etapy badania, w których nastąpił przedmuch ogniwa gazem i produktami reakcji chemicznej w ogniwie.



Rys. 7. Porównanie wyników badań sprawności ogniwa w dwóch wariantach: bez modyfikacji środowiska oraz z zastosowaniem sprężonego powietrza

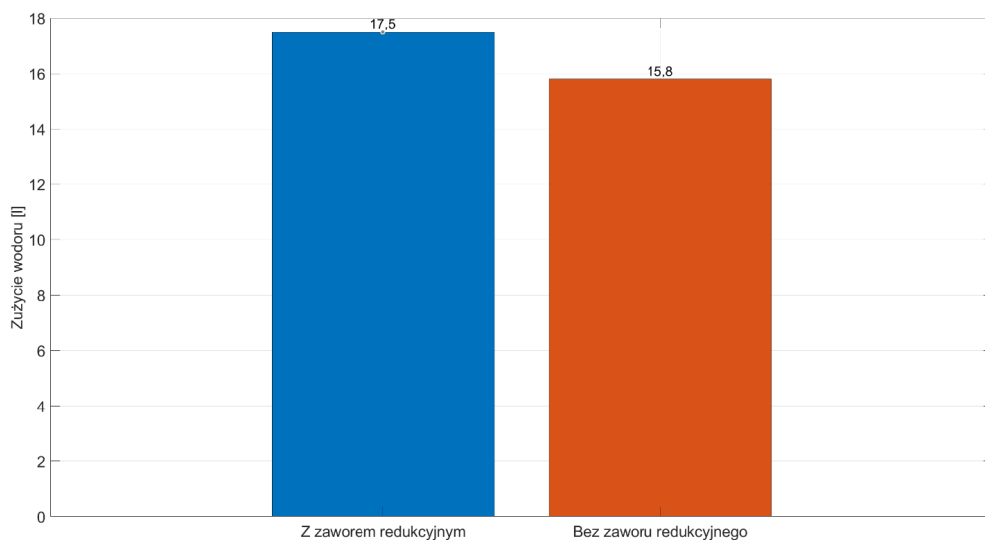
4.3. WYNIKI BADAŃ WPŁYWU ZABLOKOWANEGO ZAWORU UPUSTOWEGO NA SPRAWNOŚĆ OGNIWA

Ostatni etap badań miał na celu określenie wpływu zablokowania zaworu upustowego na zużycie wodoru podczas przeprowadzonych testów jezdnych. Przepływ wodoru mierzono za pomocą przepływomierza, który zerowano przed każdym rozpoczęciem pomiaru. Pomiar zużycia wodoru przeprowadzono w cyklu trwającym 30 minut. Uzyskane wyniki przedstawiono na wykresach słupkowych (rys. 8), ilustrujących różnice w zużyciu wodoru między przypadkami bez zastosowanego zaworu i z zastosowanym zaworem. Analiza ta pozwoliła ocenić wpływ zmienionych warunków zasilania na zużycie wodoru. Głównym założeniem było ograniczenie zużycia wodoru podczas przejazdu.

Wykres przedstawia zestawienie ilości zużytego wodoru w dwóch wariantach: z zastosowaniem zaworu redukcyjnego oraz bez niego. Wartość zużycia wodoru została podana w litrach. Wariant z zaworem redukcyjnym wykazuje wyższe zużycie wodoru na poziomie 17,5 l, natomiast w przypadku odłączenia zaworu upustowego zużycie spada do 15,8 l.

Eksperyment trwał 30 minut. Przez pierwsze 150 sekund ogniwo paliwowe pracowało bez obciążenia na zasilaczu. Następnie w 30-sekundowych interwałach podłączano dodatkowe obciążenie o wartości 15 A, odpowiadające nominalnemu punktowi pracy układu. Analiza wyników pozwala na ocenę wpływu zaworu upustowego na efektywność zużycia wodoru w systemie. W tabeli 3 przedstawione zostały przykładowe wyniki pomiarów.

Zaprezentowane dane mają charakter poglądowy i służą przedstawieniu sposobu uzyskiwania danych, na podstawie których znamy zużycie stosowanego paliwa w 30-minutowym przedziale czasowym.



Rys. 8. Zestawienie ilości zużytego wodoru

Tabela 3. Przykładowe wyniki pomiarów dla testów jezdnych

Przepływ całkowity [l]	Temperatura ogniwa na końcu [°C]	Natężenie prądu na końcu [A]	Napięcie na końcu [V]
0,08	20	1,1	24,60
1,76	21	1,1	24,66
3,52	22	1,1	24,60
5,25	22	1,1	24,60
7,02	22	1,1	24,55
8,80	22	1,1	24,55
10,55	22	1,1	24,53
12,29	22	1,1	24,48
14,14	22	1,1	24,48
15,84	22	1,1	24,47
Kolejny interwał			
1,76	28	15,1	18,80
3,51	31	15,1	18,75
5,25	31	15,1	18,70
7,02	31	15,1	18,65
8,80	31	15,1	18,60
10,55	31	15,1	18,50
12,29	31	15,1	18,40
14,14	31	15,1	18,30
15,84	31	15,1	18,28

5. ANALIZA WYNIKÓW

Badania nad wpływem zwiększonej wilgotności powietrza dostarczonego do ogniwa na jego wydajność nie wykazały zwiększenia jego sprawności. Wręcz przeciwnie, odnotowano jej spadek, co sugeruje, że nadmierna wilgotność może negatywnie wpływać na transport masy i przebieg reakcji elektrochemicznych w ogniwie. Występujący gradient stężenia między anodą a katodą powoduje, że część wody jest transportowana zwrótnie przez membranę [5]. Wykorzystanie dodatkowego nawilżenia mogło doprowadzić do utrzymania się nadmiernej ilości wody w ogniwie wodorowym, co w połączeniu z zewnętrznym nawilżeniem środowiska wokół ogniwa mogło skutkować obniżeniem sprawności.

Analiza wpływu zastosowania sprężonego powietrza na wydajność ogniwa wykazała, że w początkowej fazie jego pracy uzyskiwano wyższą sprawność przy niższych mocach. Jednakże najwyższą sprawność osiągnięto w konfiguracji bez dodatkowego dopływu sprężonego powietrza. W nominalnym punkcie pracy stabilizacja i poprawa warunków operacyjnych doprowadziły do wzrostu sprawności przy zastosowaniu sprężonego powietrza. Sterownik ogniwa ograniczył liczbę przedmuchów służących do oczyszczenia ogniwa, co bezpośrednio wpływa na zmniejszenie zużycia wodoru.

Badania nad wpływem zablokowania zaworu upustowego (purge) na parametry ogniwa wykazały zmniejszenie zużycia wodoru o 14% podczas przeprowadzenia „testów jezdnych”. Jest to istotna poprawa, która przekłada się bezpośrednio na wzrost efektywności produkcji energii elektrycznej. W typowych warunkach pracy ogniwa pewna ilość wodoru jest tracona podczas procesu oczyszczania, w którym gaz jest wykorzystywany do przedmuchu. Eliminacja tej straty pozwala na bardziej efektywne wykorzystanie paliwa. Zablokowanie zaworu na to pozwala, dzięki czemu ogniwo nie wyrzuca paliwa w atmosferę. W celu zapobiegania „zabrudzeniu” ogniwa, przed każdym startem oraz testem jest ono dokładnie czyszczone zgodnie z zaleceniami producenta. W rezultacie przez kilkadziesiąt minut pracy może ono swobodnie pracować bez konieczności samoczynnego oczyszczania.

6. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania pozwoliły na ocenę wpływu wybranych warunków środowiskowych na parametry pracy wodorowego ogniwa paliwowego PEM zastosowanego w pojeździe HYDRIVE. Dostarczyły również cennych informacji na temat optymalnych warunków pracy ogniwa wodorowego w zastosowaniach mobilnych. Uzyskane dane poszerzyły perspektywę możliwych zmian wprowadzanych w układzie doprowadzenia wodoru. Mogą one stanowić podstawę do dalszych prac nad poprawą wydajności oraz zwiększeniem trwałości układów zasilanych wodorem w pojazdach transportowych, co mogłoby mieć znaczenie w kontekście zarządzania warunkami eksploatacji ogniw paliwowych w rzeczywistych zastosowaniach transportowych.

LITERATURA

- [1] Opracowanie własne, Koło Naukowe Konstruktorów MechaniCAD.
- [2] Tümer B., Şanlı Yıldız D., Arkun Y., *Water and thermal management in PEM fuel cells using feasible humidity plots and model predictive controllers*, Computers and Chemical Engineering, vol. 192, 2025, 108905, <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2024.108905>.
- [3] Singer G., Pertl P., Trattner A., *Experiments on maximizing hydrogen utilization and efficiency in a PEM fuel cell system*, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 106, 2025, s. 1158–1166, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.02.036>.
- [4] Horizon, *H-500 XP Fuel Cell Stack*, <https://www.horizoneducational.com/h-500-xp-fuel-cell-stack/p1405> [dostęp: 23.02.2024].
- [5] Zhang J., Tang Y., Song C., Xia Z., Li H., Wang H., Zhang J., *PEM fuel cell relative humidity (RH) and its effect on performance at high temperatures*, Electrochimica Acta, vol. 53(16), 2008, s. 5315–5321, <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2008.02.074>.