

Dr hab. inż. Marek Ściążko, prof. nadzw., Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla, Zabrze  
Bogusław Smółka, Pełnomocnik Zarządu ds. Projektów Koksowych, JSW Innowacje S.A., Katowice  
Tadeusz Wenecki, Prezes Zarządu, JSW Innowacje S.A., Katowice

# Perspektywy wodoru w transporcie i energetyce

Dyskusja dotycząca przyszłości energetyki i transportu prowadzona w świecie, ale także w Polsce sprowadza się często do stwierdzenia, że wodór będzie paliwem przyszłości. Z punktu widzenia jego właściwości jest to stwierdzenie uzasadnione, jednak z uwagi na to, że nie występuje on w stanie wolnym w przyrodzie sprawa wymaga znalezienia przede wszystkim źródeł odpowiednio taniego wodoru.

Obecnie dominują paliwa kopalne stosowane dla produkcji wodoru, ale przyszłość, jak się utrzymuje, będzie należeć do odnawialnych źródeł energii pozwalających w godzinach szczytów produkcyjnych przeznaczać nadwyżki energii na elektrolizę wody i akumulowanie tej energii w wodrze. W kraju wodór produkuje się w dużej skali zarówno w przemyśle nawozów azotowych z gazu ziemnego jak i w rafineriach z gazów procesowych. Zużywany jest on na potrzeby produkcyjne tych zakładów. Istnieje jednak w kraju przemysł koksowniczy, który jest dobrze rozwinięty i produkuje gaz nadmiarowy o dużej zawartości wodoru. Stosunkowo tanim kosztem można by pozyskać wodór i dostarczyć na rynek w celu zasilania rodzącego się transportu wodorowego, w pierwszym rzędzie autobusów miejskich.

## Dlaczego wodór?

Wodór jest pierwiastkiem najobficiej występującym w przyrodzie, a także

najlżejszym. Jest bezwonny i nietoksyczny. Zawiera najwięcej energii w jednostce masy spośród znanych paliw - prawie trzykrotnie większą niż w przypadku benzyny. Wodór nie występuje w naturze w stanie wolnym z uwagi na swoją reaktywność, a jego największym magazynem chemicznym jest woda. Z tego powodu jest ona głównym źródłem wodoru i w celu jego uwolnienia stosuje się zasadniczo dwa rodzaje metod: termicznego względnie elektrochemicznego rozkładu.

Istnieje wiele argumentów uzasadniających stosowanie wodoru, do głównych należą następujące przesłanki według raportu IEA<sup>1</sup> z grudnia 2017 r.:

- Podobnie jak elektryczność, wodór jest „nośnikiem energii”. Może być wykorzystywany w szerokim zakresie zastosowań w wielu sektorach gospodarki: w transporcie, energetyce, przemyśle i mieszkalnictwie.

- Wodór można przekształcić w elektryczność za pomocą ogniwa paliwowego - urządzenia elektrochemicznego. W odróżnieniu od baterii, ogniwa paliwowe działają w sposób ciągły o ile zabezpieczymy dopływ wodoru z lokalnego zasobnika i tlenu z otaczającego powietrza.
- Ogniwa paliwowe są „skalowalne” i mogą być stosowane zarówno do zasilania w energię silnika samochodu jak i generować elektryczność w dużej skali. Jedynymi produktami ubocznymi z ogniwa paliwowego są ciepło i woda.
- Źródłem wodoru mogą być paliwa kopalne, w tym przede wszystkim metan CH<sub>4</sub>, zawierający na każdy atom pierwiastka węgla cztery atomy wodoru. Jest on obecnie podstawowym źródłem wodoru uzyskiwanego przy pomocy technologii rozkładu termicznego klasyfikowane w trzy następujące grupy: parowy reforming gazu ziemnego

1) [http://ieahydrogen.org/pdfs/Global-Outlook-and-Trends-for-Hydrogen\\_Dec2017\\_WEB.aspx](http://ieahydrogen.org/pdfs/Global-Outlook-and-Trends-for-Hydrogen_Dec2017_WEB.aspx)

(SMR), częściowe utlenianie (POX) i reformowanie autotermiczne (ATR), które łączy się z SMR.

- Wodór może być otrzymywany z wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii. Obecnie na świecie obserwuje się znaczny wzrost zainstalowanej mocy odnawialnych źródeł energii głównie wiatru i słońca i odpadowej biomasy.
- W wyniku występowania pików produkcji energii w źródłach odnawialnych odbiór energii do sieci jest ograniczony. W takiej sytuacji można przeznaczyć nadwyżki energii elektrycznej do produkcji wodoru, jako chemicznego magazynu energii. Wodór i elektryczność to w rzeczywistości uzupełniające się nośniki energii: wodór można przekształcić w elektryczność i elektryczność można przekształcić w wodór.
- Wykorzystanie wodoru do magazynowania energii (krótkoterminowe, sezonowe czy też jako długoterminowa rezerwa) pozwala stabilizować system energetyczny. Prowadzi się przygotowania do podziemnego składowania wodoru w kawernach solnych i wyczerpanych pokładach ropy naftowej.
- Wodór może być użyty do sprzężenia sektorów poprzez konwersję nadwyżki energii elektrycznej (mocy) i dostawę wodoru do zastosowań innych niż energetyczne, np. w transporcie, przemyśle i mieszkalnictwie. Wykorzystanie międzysektorowe zwiększa integrację systemu energetycznego i sprzyja rozwojowi infrastruktury wodorowej.
- Wodór może być wykorzystywany do zdecentralizowanej produkcji energii w przyszłej strukturze energetycznej, w której rozważa się dominację generacji rozproszonej. Ryzyko inwestycyjne produkcji wodoru ze źródeł odnawialnych jest znacznie mniejsze niż w dużych układach scentralizowanych z uwagi na mniejsze nakłady inwestycyjne.

- Pojazdy elektryczne z ogniwami paliwowymi (FCEV) zasilane wodorem są bezemisyjne podobnie jak pojazdy elektryczne bateryjne. Pozwalają one jednak na co najmniej dwukrotnie większy zasięg.
- Wodór może być stosowany w przypadkach trudnych do elektryfikacji, w których obecnie stosuje się olej napędowy. Do tej grupy należą: transport ciężki, nielektryczne pociągi i transport morski.
- Wodór ze źródeł odnawialnych może zastępować paliwa kopalne w przemyśle chemicznym, w którym obecnie produkcja wodoru odbywa się z wykorzystaniem węgla, ropy naftowej i gazu ziemnego.

#### Japonia - kraj rozwoju gospodarki wodorowej

Japonia<sup>2</sup> jest obecnie wiodącym krajem rozwijającym technologie wodorowe zarówno w transporcie jak i rozproszonym wytwarzaniu energii. Tradycyjnie wodór był stosowany głównie do rafinacji ropy naftowej i do produkcji amoniaku, a następnie nawozów azotowych. Wodór od dawna jest uważany za czystą alternatywę dla benzyny. Od lat siedemdziesiątych trwają dyskusje na temat gospodarki opartej na wodrze w konfrontacji z gospodarką wykorzystującej węglowodory.

Doprowadzając do kontaktu wodoru i tlenu w ogniwie paliwowym można wytwarzać energię elektryczną, w tym także ciepło. Zastosowanie wodoru do napędu samochodów, w tym autobusów, ciężarówek i wózków widłowych, może znacznie zmniejszyć emisję ditlenku węgla. Jednak pomimo tego potencjału w przeszłości istniało wiele przeszkód w przekształcaniu się w gospodarkę wodorową. Główną przeszkodą były wysokie koszty rozwoju ogniw paliwowych. Podstawowymi rynkami rozwoju ogniw paliwowych są Japo-

nia i USA, a następnie Chiny i Europa. Japonia zajęła wiodącą pozycję w dziedzinie produkcji energii elektrycznej na małą skalę i rozwoju samochodów napędzanych wodorem.

Zgodnie z prognozą Navigant Research, oczekuje się, że światowy rynek stacjonarnych ogniw paliwowych wzrośnie z 1,4 mld USD w 2014 r. do 40 mld USD w 2022 r.<sup>3</sup>

Od 2009 r., czasu ogłoszenia wsparcia dla programu wodorowego w Japonii szybko uruchomiono rynek stacjonarnego wytwarzania energii w domach w wyniku rządowego wsparcia środkami finansowymi. W ramach programu ENE-FARM (gospodarstwo energetyczne), zainstalowano do 2016 r. 150 000 mikro-elektrociepłowni (*Combined Heating and Power*)<sup>4</sup>.

Podobnie z kilkoma potknięciami organizacyjnymi w ciągu ostatnich 10-15 lat, stworzono solidne podstawy dla rozwoju pojazdów napędzanych ogniwami wodorowymi (FCV). W Japonii rząd subsyduje pojazdy typu FCV według modelu stosowanego wcześniej dla promocji modeli hybrydowych. W grudniu 2014 r. Toyota wprowadziła na rynek pierwszy na świecie masowo produkowany samochód z ogniwami paliwowymi, ale aby rynek mógł się rozwijać, konieczne jest zbudowanie infrastruktury wodorowej. Oprócz inicjatyw rządowych, Toyota, Honda i Nissan nawiązały ze sobą współpracę w celu finansowego wsparcia sieci tankowania wodorem.

W grudniu 2013 r., po zarzuceniu rozwoju energetyki nuklearnej, Ministerstwo Gospodarki, Handlu i Przemysłu (METI) utworzyło Radę ds. Strategii na rzecz wodoru i ogniw paliwowych w celu określenia podejścia do przyszłego wykorzystania energii wodorowej poprzez współpracę między prze-

3) Stationary Fuel Cells Will Reach \$40 Billion in Annual Revenue by 2022", Navigant Research, March 20, 2014 <https://www.navigantresearch.com/newsroom/stationary-fuel-cells-will-reach-40-billion-in-annual-revenue-by-2022>

4) GA Newsletter", Japan Gas Association, Newsletter No. 30, March 24, 2016, [http://www.gas.or.jp/en/newsletter/vo\\_30.htm](http://www.gas.or.jp/en/newsletter/vo_30.htm)

2) [http://ieahydrogen.org/pdfs/Global-Outlook-and-Trends-for-Hydrogen\\_Dec2017\\_WEB.aspx](http://ieahydrogen.org/pdfs/Global-Outlook-and-Trends-for-Hydrogen_Dec2017_WEB.aspx)

mystem, środowiskiem akademickim i rządem. W kwietniu 2014 r. rząd zatwierdził czwarty strategiczny plan energetyczny, który jasno określa użycie wodoru i potrzebę sformułowania planu działania na rzecz realizacji społeczeństwa wodorowego. Dwa miesiące później, w czerwcu 2014 r., Rada opracowała strategiczny plan działania na rzecz wodoru i ogniw paliwowych, który przedstawia zintegrowane podejście do produkcji wodoru, magazynowania, transportu i jego zastosowań.

Opracowana mapa drogowa składa się z trzech etapów:

Etap 1: Zwiększenie liczby domowych ogniw paliwowych do 1,4 miliona do 2020 r. i 5,3 miliona do 2030 r. Poszerzenie liczby stacji tankowania wodoru dla FCV do 100 i pełnego skomercjalizowania pojazdów FCV w 2015 r.

Etap 2: Lata 2025-2030. Wprowadzenie wytwarzania wielkoskalowego energii elektrycznej na bazie wodoru i zbudowanie systemu dostaw wodoru na dużą skalę.

Etap 3: 2040 i później. Produkcja na pełną skalę wodoru, transport i jego magazynowanie bez emisji CO<sub>2</sub> z ewentualnym wykorzystaniem technologii wychwytywania i składowania dwutlenku węgla (CCS) w przypadku produkcji wodoru z wykorzystaniem paliw kopalnych.

W marcu 2016 r. Rada wydała poprawioną wersję powyższego planu działania. Najważniejsze zmiany to:

- Ustanowiono przyszłe cele cenowe dla ogniw paliwowych do użytku domowego (poniżej 1 kW) dla ogniw typu PEMFC (ogniwa paliwowe z wymianą protonów) na 800000JPY do 2019 r. Obecna cena subsydiowana wynosi 1,42 mln JPY.
- W przypadku ogniw typu SOFC (stało-tlenkowe ogniwa paliwowe) cena ta powinna wynosić 1 milion JPY do 2021, obecnie 1,77 mln JPY.
- Cele dla ekspansji FCV - ok. 40 000 FCV do 2020 r.; 200 000 do 2025; i 800 000 do 2030.
- Cele dla budowy stacji tankowania wodoru: 160 stacji do 2020 r., 320 stacji do 2025 r.

#### Możliwe źródła pozyskania wodoru

W 2013 r. światowe zużycie wodoru wyniosło łącznie 7,2 EJ (ekwiwalent 43 mln ton)<sup>5</sup>. Dotychczas wódór nie był wykorzystywany jako nośnik energii, tj. nie jest przetwarzany na energię elektryczną, energię mechaniczną ani ciepło. Wódór jest prawie w całości

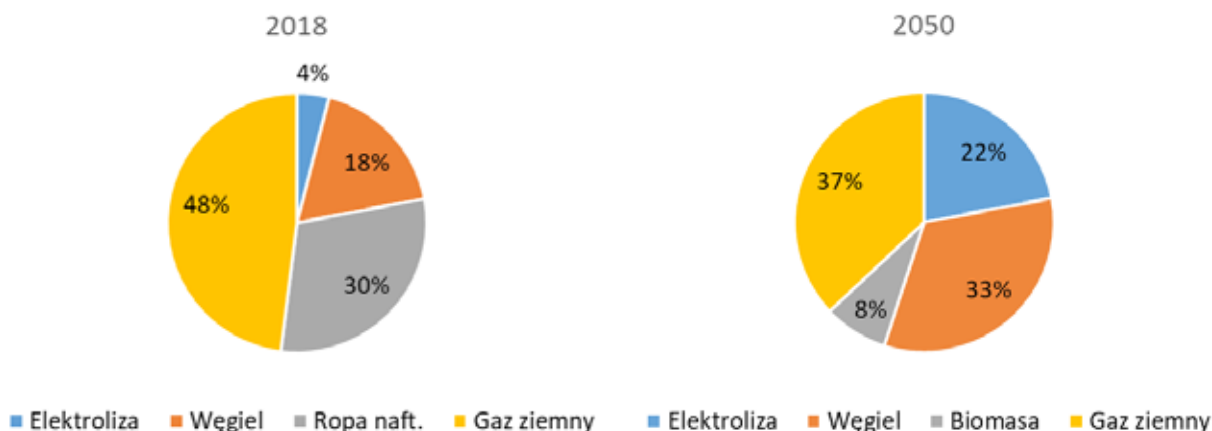
wykorzystywany jako surowiec w przemyśle rafinacyjnym i chemicznym do przetwarzania surowców na produkty chemiczne lub rafineryjne. Oczekuje się, że globalne zapotrzebowanie na wódór wymusi co najmniej 3,5% przyrostu zdolności produkcyjnych rocznie, z tego ok. 50% będzie oparte o źródła odnawialne<sup>6</sup>. Według IEA<sup>7</sup> podstawowe źródła wodoru będą ulegały znaczącej zmianie.

Należy zwrócić uwagę na istotne przyszłe znaczenie węgla w tej prognozie, co wskazuje, że zgazowanie węgla będzie miało bardzo ważne miejsce na mapie technologicznej. Niestety kolejne próby wdrożenia tej technologii w kraju są jak na razie opóźnione.

Rozważając jednak potencjalne źródła wodoru w kraju wydaje się, że gaz koksowniczy może być najtańszym źródłem wodoru. W składzie gazu powstającego w procesie koksowania zawartość wodoru wynosi 50-60% obj. Gaz ten w połowie stosowany jest do produkcji koksu (ogrzewania baterii koksowniczej), a pozostała część stosowana jest w sposób kwalifikowany w układach

6) [http://www.fch.europa.eu/sites/default/files/project\\_results\\_and\\_deliverables/D5.1.%20Implementation%20Roadmap-v15-final.pdf](http://www.fch.europa.eu/sites/default/files/project_results_and_deliverables/D5.1.%20Implementation%20Roadmap-v15-final.pdf)

7) <https://energiforskmedia.blob.core.windows.net/media/23562/5-hydrogen-production-by-electrolysis-ann-cornell-kth.pdf>



Rys 1. Surowce pierwotne stosowne do produkcji wodoru obecnie i w perspektywie 2050 r.

CHP względnie spalana nieefektywnie w pochodniach.

Jedynie w koksowniach Jastrzębskiej Spółki Węglowej (JSW) w gazie koksowniczym dostępne jest ok. 75 tys. ton wodoru rocznie. Pozwala to na przejechanie 7,5 mld km samochodami typu Toyota Mirai.

Porównując koszty produkcji wodoru z gazu z koksowniczego z innymi technologiami można stwierdzić, że jest to technologia bardzo konkurencyjna do innych już stosowanych czy też dopiero rozważanych. Według Departamentu Energii USA technologia stanie się przelotową kiedy cena wodoru osiągnie wartość nie większą niż 2,5 USD/galon ekwiwalentnego paliwa benzynowego.

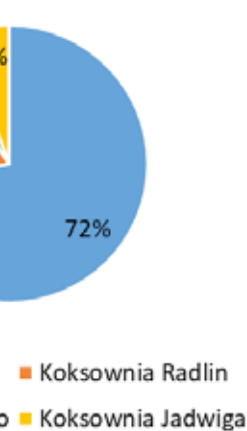
Jednym z kluczowych wyzwań technologicznych jest produkcja wodoru o bardzo wysokiej czystości rzędu 99,999% akceptowanej przez najbardziej rozwinięte obecnie konstrukcje ogniwi paliwowych typu PEM. Z tego też powodu konieczne jest przejście przez skalę demonstracyjną o wielkości 50-100 kg wodoru/h, aby opanować tę technologię i zbudować rynek trans-

portu wodorowego, a następnie podjąć decyzje o pełnej skali produkcyjnej rzędu 10 tys. ton rocznie.

#### Transport wodorowy

Według Raportu<sup>8</sup> przygotowawanego dla Stanu Kalifornia (USA) samochody z napędem wodorowym będą

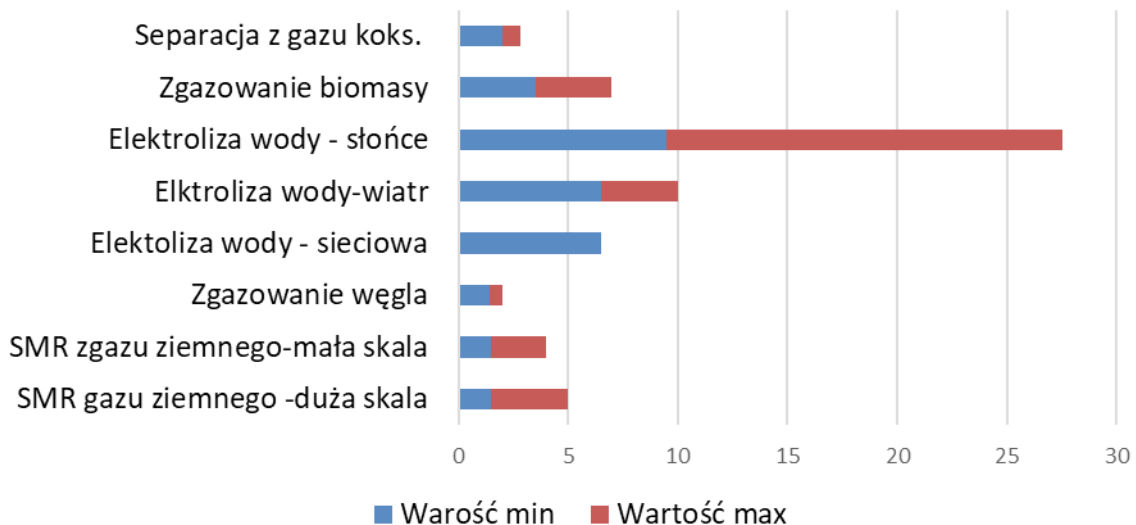
8) [http://www.fuelcelltoday.com/media/1711108/fuel\\_cell\\_electric\\_vehicles\\_-\\_the\\_road\\_ahead\\_v3.pdf](http://www.fuelcelltoday.com/media/1711108/fuel_cell_electric_vehicles_-_the_road_ahead_v3.pdf)



Rys. 2. Potencjał wodoru w koksowniach JSW

odgrywały coraz większą rolę w przyszłych rozwiązaniach komunikacyjnych.

Już obecnie w Japonii komercyjnie eksploatuje się stacje tankowania samochodów wodorowych, dla których wodór produkuje się lokalnie w kontenerowych stacjach reformingu gazu ziemnego w wydajności 300 m<sup>3</sup> wodoru/h. Ciekawostką jest to, że samochody Toyota Mirai posiadają w bagażniku przygotowane przyłą-



Rys. 3. Szacowane koszty produkcji wodoru w zależności od technologii<sup>1</sup>, USD/kg

1) <https://www.nrdc.org/sites/default/files/hydrogen.pdf>

cze do podłączenia kablem zasilania sieci domowej, kiedy samochód jest zaparkowany w domowym garażu. Zatem staje się on wtedy źródłem energii elektrycznej.

### Wytwarzanie elektryczności

Ogniwa paliwowe są dostępne lub są opracowywane dla szeregu zastosowań stacjonarnych i pojazdów. Zastosowania energetyczne obejmują układy wytwarzające energię elektryczną i ciepło (200-2800 kW), czystą generację elektryczną (105-210 kW), systemy mieszkaniowe i komercyjne do kogeneracji (3-10 kW), rezerwowe i przenośne systemy zasilania (0,25-5 kW).

Potencjalne przewaga systemów opartych na ogniwach paliwowych wynika z dużej elastyczności pracy, w szczególności w lokalnych zastosowaniach. Ponadto istnieją możliwości uzyskania znacznie wyższej sprawności wykorzystania paliwa pierwotnego do wytwarzania energii elektrycznej.

General Electric<sup>9</sup> oferuje układy CHP o mocy kilku MW zasilane gazem ziemnym, który podlega reformingowi

9) [https://www.ge.com/sites/default/files/GE\\_FuelCells.pdf](https://www.ge.com/sites/default/files/GE_FuelCells.pdf)

na wodór, zasilający następnie ogniwo tlenkowe (SOFC) i w rezultacie sprawność wytwarzania energii elektrycznej wynosi 65%, a sprawność całkowita układu z uwzględnieniem ciepła 90%.

W Nowym Yorku opracowano szeroki program impelmentacji technologii ogniw paliwowych, dla zastosowań energetycznych planując wdrożyć ok. 700 MWe stacjonarnych układów generacji elektryczności i ciepła. Głównymi argumentami jest brak hałasu, brak emisji szkodliwych substancji, wysoka sprawność, duża elastyczność włączania do systemu.

W znanym czasopiśmie branżowym Power Engineering<sup>10</sup> doniesiono, że w 2016 r. wydano zgodę na budowę największej na świecie jednostki wytwórczej bazującej na wodorze o mocy 63,3 MWe w Connecticut (USA). Wynika z tego, że technologia ta osiąga coraz większą dojrzałość technologiczną i należy się spodziewać w krótkim czasie kolejnych układów o mocy osiągniętej 100 MWe.

10) <https://www.power-eng.com/articles/blogs/power-points/2016/02/fuel-cells-to-play-important-role-in-power-generation.html>

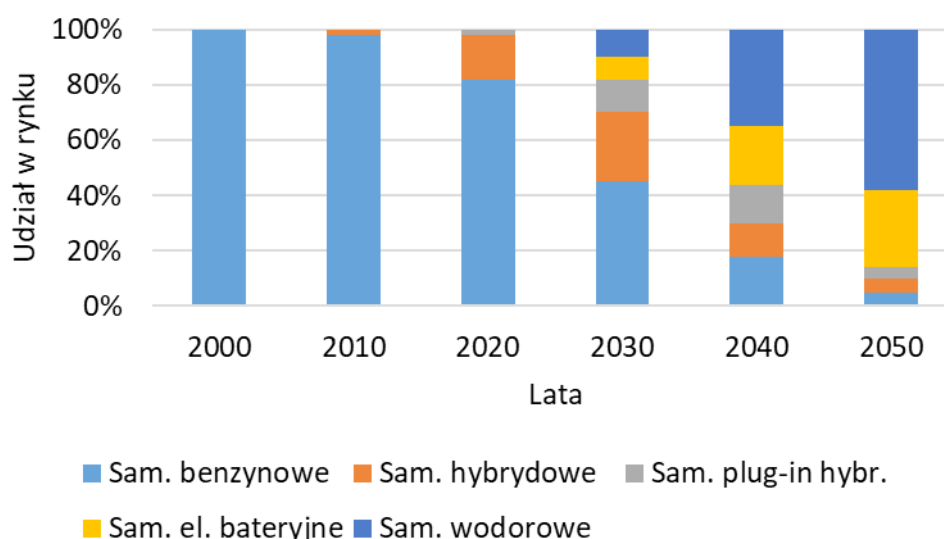
### Wnioski

W niektórych krajach termin „gospodarka wodorowa” nabiera bardzo praktycznego znaczenia. W Japonii i w USA stworzono programy rządowe, wspierające demonstrację technologii wodorowych zarówno w transporcie i energetyce.

Rynkami wschodzącymi w tej dziedzinie na pewno będą Chiny, gdzie hasło elektro-mobility obejmuje dwa rodzaje źródeł energii, tzn. baterie i ogniwa paliwowe zasilane wodorem.

Powodzenie implementacji technologii wodorowych zależy w głównej mierze od dostępu do stosunkowo taniego wodoru. Spośród dostępnych źródeł krajowych pozyskanie wodoru z nadmiarowego gazu koksowniczego może być najefektywniejszą metodą dla stworzenia pełnego ciągu: produkcja wodoru - dystrybucja - stacja paliwowa - transport wodorowy.

Powstanie wówczas możliwość rozwoju zapotrzebowania na lokalne źródła generacyjne oparte o ogniwa paliwowe.



Rys. 4. Udział samochodów osobowych w zależności od rodzaju napędu