

Efektywność energetyczna i środowiskowa wybranych metod wykorzystania wodoru

Energy and environmental efficiency of selected methods to use hydrogen

W artykule przedstawiono przegląd wybranych metod zastosowania wodoru pochodzącego ze źródeł odnawialnych – rozważono finalne zastosowanie w energetyce, w transporcie indywidualnym i zbiorowym, w przemyśle oraz w gazownictwie poprzez zatłaczanie do sieci gazu ziemnego. Ocenie podlegała sprawność i systemowa efektywność łańcucha wodorowego z uwzględnieniem magazynowania pod ciśnieniem zależnym od sposobu wykorzystania finalnego. Sprawność procesu waha się od 24% (wykorzystanie wodoru w turbinach gazowych) do 60,8% (wykorzystanie w przemyśle lub gazownictwie), jednak w tym drugim przypadku produkowany nośnik podlega jeszcze dalszej konwersji energii. Porównując procesy zastąpione (np. zasilanie samochodów spalinowych, produkcja wodoru z reformingu) uzyskuje się ranking efektywności systemowej, w którym najkorzystniej wypada motoryzacja indywidualna (efektywność 144,8%, czyli mniejsza energochłonność względem obecnych paliw), w dalszej kolejności przemysł i transport autobusowy. Każdy z wariantów wykorzystania wodoru zapewnia także oszczędność emisji CO₂, najwyższą dla motoryzacji indywidualnej i energetyki, a najmniejszą w przypadku zatłaczania wodoru do sieci gazu ziemnego.

Słowa kluczowe: produkcja, magazynowanie i zagospodarowanie wodoru, metody zastosowania wodoru, efektywność energetyczna, oszczędność emisji CO₂

The paper reports selected methods of green hydrogen utilisation: for power generation, private cars and public transport, for industry and for blending with natural gas in distribution networks. The evaluated parameters comprise the efficiency and system performance of the hydrogen value chain, accounting for its storage under the pressure required for the given process. The process efficiency ranges from 24% (gas turbines) to 60.8% (industry, gas networks), however, in the latter case the produced hydrogen is not a final energy carrier. Another ranking is obtained if the analysis also comprises the corresponding replaced processes (e.g. cars using oil-based fuels, steam methane reforming for hydrogen production); in this case hydrogen-fuel cell passenger cars yield the best system performance (144.8%, i.e. the process is less energy consuming than the existing one), followed by industry and hydrogen-fuelled buses. Each method of hydrogen utilisation also provides a reduction in CO₂ emission, the ranking is opened by passenger cars followed by power generation, and it is closed by hydrogen injection into natural gas grid.

Keywords: production, hydrogen storage and utilisation, hydrogen application methods, energy efficiency, CO₂ emission reduction

Wstęp

W obecnej sytuacji geopolitycznej wypracowanie racjonalnej gospodarki energetycznej jest najważniejszym wyzwaniem cywilizacyjnym. W idealnej sytuacji skoncentrowana energia użytkowa byłaby dostępna w tej formie, w tym czasie i na tym miejscu, gdzie jest aktualnie potrzebna [1]. W rzeczywistości jednak zachodzi konieczność pozyskiwania nośników energii pierwotnej (paliwa kopalne, jądrowe, źródła odnawialne), ich konwersji i transportu do odbiorców energii finalnej (energia elektryczna, ciepło, paliwa do bezpośredniego użycia).

W Polsce, zgodnie z raportem IEA [2], na źródła energii pierwotnej składa się w 40,6% węgiel (kamienny i brunatny), 29,6% ropa naftowa, 17,4% gaz ziemny oraz 12,4% źródła odnawialne (OZE)²⁾. Nieco inaczej przedstawia się struktura wytwarzania (mix) energii elektrycznej: według IEA 2020: 68,5% węgiel, 10,7% gaz, 1,2% paliwa ropopochodne, 12,6% OZE, w tym 10,1% energia wiatru, przy czym charakterystyczny jest wzrost i równocześnie fluktuacje udziału OZE. Przykładowo, w dniu 12 lipca 2022 r. udział OZE w dobowej produkcji energii elektrycznej wyniósł 31,5%, w tym aż 20,7% z energii wiatrowej [3].

Obecny sposób pokrywania potrzeb energetycznych (w tym produkcji energii elektrycznej) w Polsce wiąże się z szeregiem problemów. Dominujący udział węgla powoduje, że jednostkowa emisja CO₂ wynosi aż 657 g/kWh (2021), wyższą wartość w Europie odnotowuje jedynie Kosowo [4]. Zmienny udział generacji wiatrowej i słonecznej powoduje, że regulacja mocy w systemie odbywa się poprzez wymuszanie pracy jednostek węglowych w obciążeniu częściowym, co negatywnie wpływa na ich sprawność i jednostkową emisję CO₂, kasując niejako część redukcji emisji z działania OZE. Ponadto, drastyczny wzrost cen i możliwe braki w zaopatrzeniu w węgiel i gaz ziemny w całej Europie spowodują przyspieszenie wzrostu udziału OZE przy braku elastyczności systemu. Również sektor transportu odczuwa bardzo wysoki wzrost cen benzyny i oleju napędowego, a rozwój samochodów elektrycznych może być ograniczony dostępnością surowców do ich produkcji. Dostępność i ceny paliw, bezpieczeństwo energetyczne oraz kwestie klimatyczne (emisja CO₂) w zasadzie jednoznacznie wskazują na konieczność dekarbonizacji gospodarki, przy czym z uwagi na bezpieczeństwo energetyczne należy najpierw zwiększać pulę dostępnych rozwiązań zachowując gotowość technologiczną całego sektora.

Elastyczność sektora energetycznego można znacząco zwiększyć dzięki zastosowaniu **wodoru**. Jak stwierdzono w Polskiej Strategii Wodorowej [5] „*wodór, pełniąc rolę magazynu energii, może odegrać istotną rolę w procesie osiągnięcia neutralności*”

¹⁾ wojciech.kostowski@polsl.pl

²⁾ Raport 2022, dane za rok 2020. Udział OZE w pokryciu energii finalnej jest wyższy i w raportowanym okresie wyniósł 16,1%.

klimatycznej”, a także może on zaferować „rozwiązania dla tych segmentów gospodarki, w których trudno osiągnąć redukcję emisji w drodze elektryfikacji”.

W niniejszym artykule podjęto próbę zestawienia dostępnych metod produkcji, magazynowania i użytkowania wodoru w kontekście ich efektywności energetycznej oraz redukcji emisji CO₂. W przypadku produkcji wodoru ze źródeł odnawialnych każdy sposób jego późniejszego wykorzystania przynosi korzyści, lecz ich skala nie jest jednolita, a ranking rozwiązań jest różny według kryterium energetycznego i środowiskowego.

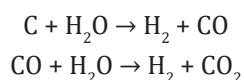
Produkcja, magazynowanie i zagospodarowanie wodoru

Produkcja wodoru

Istnieje wiele metod produkcji wodoru, które można klasyfikować ze względu na technologię bądź ze względu na efekt środowiskowy. Warta przytoczenia jest klasyfikacja „barwna” wodoru, wskazująca na źródło i sposób jego wytwarzania.

Wodór czarny – wytwarzany jest z węgla kamiennego. Wyróżnia się tu dwie grupy technologii – *zgazowanie* oraz *suchą destylację*.

Zgazowanie, w którym do procesu doprowadzany jest tlen i para wodna, a wodór powstaje w reakcjach:



z reakcji tych wynika nieunikniona emisja 1 kmol CO₂/2 kmol H₂, co odpowiada **11 kg/kg H₂**, jednak biorąc pod uwagę całość procesu emisja ta sięga około 17–22 kg/kg H₂ [6].

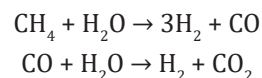
Ponadto, wodór czarny może być wytwarzany w procesie *suchej destylacji*, bez doprowadzania pary wodnej; proces taki realizowany był w przypadku produkcji gazu miejskiego (Gliwice 1818 r.), a obecnie w produkcji gazu koksowniczego. Powstały z rozbitcia łańcuchów węglowodorowych gaz (miejski/węglowy, koksowniczy) zawiera ponad 50% wodoru. Alokacja emisji CO₂ jest w tym przypadku mniej oczywista: przykładowo w przypadku gazu miejskiego należy uwzględnić emisje ze spalania pozostałych składników gazu (CH₄, CO, C₂H₄, C₃+), emisje ze spalania koksu pogazowego oraz koksu opałowego do procesu, obciążenie emisyjne jest jednak nieco niższe (12–14 kg/kg H₂ [6]).

W każdym przypadku wodór jest separowany z powstałego syngazu/gazu koksowniczego poprzez proces adsorpcji zmiennociśnieniowej (PSA). Produkcję wodoru z gazu koksowniczego zapowiada w Polsce m.in. *Jastrzębska Spółka Węglowa (JSW S.A.)*.

Wodór brązowy – wytwarzany z węgla brunatnego, proces dostępny jako komercyjna technologia (*Shell, Kawasaki*), w Polsce nie jest realizowany. Wskaźniki emisji podobne jak dla zgazowania węgla kamiennego – ok. 20 kg/kg [6].

Wodór szary – produkowany jest z gazu ziemnego poprzez reforming parowy metanu.

Wodór powstaje w reakcjach:



z reakcji tych wynika bezpośrednio nieunikniona emisja 1 kmol CO₂/4 kmol H₂, co odpowiada masowo 5,5 kg/kg H₂ emisji netto, emisja brutto procesu sięga 9 kg CO₂/kg H₂ [7]. Energochłonność procesu wynosi 40–60 kWh/kg H₂ [8].

Produkcja wodoru z reformingu parowego odpowiada za 75% produkcji w Polsce [5], dlatego też *ten proces został w dalszej części analizy przyjęty jako referencyjny*, z energochłonnością 40,4 kWh/kg H₂.

Wodór błękitny jest wodorem produkowanym z reformingu parowego (tj. szarym), jednak z sekwestracją CO₂, co ma prowadzić do uzyskania teoretycznie zerowej emisji CO₂. Jak wykazują jednak Howarth i Jacobson [9] emisja brutto wynosi co najmniej 5,63 kg CO₂/kg H₂, a z uwzględnieniem transportu gazu ziemnego i jego emisji procesowych – nawet 19,15 kg CO₂/kg. Propozycja produkcji wodoru błękitnego ma zatem raczej charakter *greenwashingu*, a realne korzyści dla klimatu Ziemi są wątpliwe.

Sekwestracja CO₂ może także dotyczyć wodoru czarnego/brunatnego, w tym przypadku emisje brutto wahają się od 2 do 5,5 kg CO₂/kg H₂ [6].

Wodór turkusowy powstaje przez pirolizę plazmową metanu (firma *Hiiroc*), w Polsce rozwijana jest także zbliżona technologia dla mieszaniny metanolu i wody [10]. W przypadku technologii *Hiiroc*, piroliza prowadzi do rozbitcia CH₄ na wodór 2 H₂ i atomowy węgiel C. Deklarowana jest zerowa emisja z procesu, co może mieć sens jedynie w przypadku składowania otrzymanego węgla i rezygnacji z jego spalania.

Wodór zielony produkowany jest z elektrolizy wody, przy czym elektrolizer zasilany jest energią elektryczną pochodzącą ze źródeł odnawialnych (w szczególności wiatrowych). Spośród różnych typów elektrolizerów najbardziej odpowiednie są elektrolizery typu PEM oraz alkaliczne, osiągające sprawności procesu (*voltage efficiency*) odpowiednio 67–82% oraz 62–82% [11]. Biorąc jednak pod uwagę straty transformacji, konwersji AC/DC oraz zużycie własne, można przyjąć sprawność netto na poziomie max. 62–64% [12], przy czym sprawność ta zdefiniowana jest na podstawie wartości opałowej wodoru. Proces elektrolizy wody nie emituje CO₂, natomiast wytwarzany jest tlen, który może być opcjonalnie zagospodarowany.

Wodór żółty jest pojęciem niejednoznacznym. Spotyka się cztery definicje, przy czym trzy z nich są związane z promieniowaniem słonecznym:

- powstaje w elektrolizie przy zasilaniu energią elektryczną z farmy PV,
- powstaje w elektrolizie przy zasilaniu mieszanym ze źródeł odnawialnych i kopalnych,
- powstaje w wyniku bezpośredniego rozkładu wody pod wpływem promieni słonecznych w obecności katalizatorów,
- powstaje w wyniku termochemicznego rozkładu wody w wysokiej temperaturze uzyskiwanej z koncentratorów słonecznych.

Wodór różowy jest wodorem uzyskiwanym z elektrolizy przy zastosowaniu energii elektrycznej pochodzącej z energii jądrowej, planuje się tu zwłaszcza wykorzystanie małych reaktorów jądrowych (m.in. *ORLEN*).

Wodór czerwony jest również uzyskiwany z energii jądrowej, jednak na zasadzie termochemicznego rozkładu wody (podobnie jak w przywołanym mechanizmie słonecznym) [13].

Wodór purpurowy może oznaczać wodór z energii jądrowej uzyskiwany w elektrolizie ze wzmocnieniem termicznym [14].

Mowa jest także o **wodorze białym**, występującym naturalnie w formacjach skalnych, jednak nie ma obecnie metod jego wydobycia.

Przedstawiona klasyfikacja jest umowna, a stosowane pojęcia ulegają niekiedy przesunięciom (zwłaszcza niestabilna jest nomenklatura dotycząca wodoru z energii jądrowej). Warto zwrócić uwagę na fizykochemiczne pochodzenie wodoru:

- wodór turkusowy oraz wodór czarny z procesu koksowania pochodzi z paliwa,
- wodór szary pochodzi częściowo z metanu, a częściowo z pary wodnej,
- pozostałe rodzaje wodoru pochodzą z wody lub pary wodnej.

Polska Strategia Wodorowa wprowadza prostszą, 3-stopniową klasyfikację wodoru:

- **wodór odnawialny**, obciążony emisją poniżej 1 kg CO₂ eq/kg H₂ i produkowany ze źródeł odnawialnych;
- **wodór niskoemisyjny**, obciążony emisją poniżej 5,8 CO₂ eq/kg H₂;
- **wodór konwencjonalny** – pozostałe kategorie.

Wodór odnawialny jest przewidziany do wsparcia finansowego. Kategoria obejmuje wodór zielony i żółty (słoneczny) oraz ewentualnie wodór szary i czarny w przypadku wykorzystania biowęgla i biometanu. **Wodór niskoemisyjny** obejmuje wodór pochodzenia jądrowego oraz wodór turkusowy i błękitny (z sekwestracją CO₂). Może on otrzymać ograniczone wsparcie, np. w postaci niskoprocentowanych kredytów. **Wodór konwencjonalny** nie odgrywa roli w transformacji energetycznej, a wręcz jego produkcja powinna być zastąpiona wodorem odnawialnym.

Koszt produkcji wodoru (dane sprzed wojny rosyjsko-ukraińskiej) waha się od ok. 1 €/kg (wodór szary/czarny) do nawet 12 €/kg (wodór zielony). Przeciętny koszt produkcji wodoru zielonego to 6–8 €/kg.

Magazynowanie wodoru

Magazynowanie wodoru jest problematyczne, gdyż wodór jest najlżejszym pierwiastkiem w każdym stanie skupienia. Akumulacja możliwa jest na kilka sposobów.

1. **Magazyny wodoru sprężonego** – to podstawowy sposób akumulacji w postaci wiązek butli, obecnie stosowane są głównie butle typu 4-kompozytowe z włóknem węglowym, ciśnienie akumulacji waha się od 30 do 1000 barów

(zbiorniki dla autobusów: 350 barów, dla samochodów 700 barów). Magazyny w formie wiązek butli mogą mieć pojemność do 1000 kg.

2. **Magazyny w strukturach metalicznych** – wodór ulega adsorpcji na powierzchniach międzykrystalicznych struktur palladu, bądź struktur La-Ni lub Na-Al. Wyższa gęstość akumulacji pozwala obniżyć ciśnienie gazowego H₂ do 40 barów, dostępna pojemność jest jednak podobna jak w magazynach sprężonych – maksymalnie do 1000 kg, typowo poniżej 260 kg. Wadą rozwiązania jest konieczność podgrzewania zbiornika w celu uwolnienia wodoru, a chłodzenia w fazie ładowania.
3. **Magazyny wodoru ciekłego** – rozwiązanie zapewnia dużą koncentrację energii, zbiornik na ciągnik siodłowy 38 m³ akumuluje tu ok. 2,7 ton wodoru (ciecz wielokrotnie lżejsza od wody!). Poważną wadą jest zużycie energii na skroplenie wodoru, sięgające aż 30% energii chemicznej wodoru (dla porównania, skroplenie gazu ziemnego wymaga 7% jego energii). Z tego względu sposób ten ma zastosowanie niszowe, np. w przemyśle kosmicznym.
4. **Podziemne magazyny wodoru** – to rozwiązanie może mieć istotne znaczenie dla osiągnięcia realnej, dużej pojemności operacyjnej dla polskiego systemu energetycznego. W projekcie badawczym HESTOR [12] analizowano budowę dwóch alternatywnych kavern solnych (struktura tak jak dla podziemnych magazynów gazu ziemnego, np. w Mogilnie). Jedna z planowanych kavern na głębokości > 1 km mogłaby mieć pojemność 347 000 m³, co pozwalałoby na akumulację ok. 2250 ton wodoru (zakres operacyjny 27–115 barów). Budowa magazynu wiązałaby się z bardzo wysokimi nakładami inwestycyjnymi, powrót do tej koncepcji może być jednak konieczny w przyszłości.
5. **Sieci przesyłowe czystego wodoru**, rozwijane w ramach projektu European Hydrogen Backbone. Pojemność takiego magazynu zależeć będzie od rozległości sieci; orientacyjnie: 100 km sieci DN500 przy ciśnieniu 100 barów to akumulacja ok. 175 ton wodoru.

Wykorzystanie wodoru

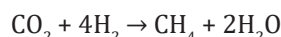
Wykorzystanie wodoru, podobnie jak produkcja i magazynowanie, jest możliwe na wiele sposobów, spośród których warto wymienić poniżej wymienione sektory.

1. **Energetyka** – wodór może być wykorzystywany do produkcji energii elektrycznej w ogniwach paliwowych (sprawność ok. 30-70% zależnie od typu) bądź w turbinach gazowych (sprawność ok. 40%) w mieszance z gazem ziemnym lub niezależnie (w niektórych modelach turbin). W tym przypadku wodór pełni funkcję typowego akumulatora energii w układzie P2G2P (*power-to-gas-to-power*).
2. **Transport** – wodór może być wykorzystywany do napędu pojazdów osobowych, autobusów, samochodów ciężarowych oraz pojazdów szynowych, w tym kolei. Pojazd wodorowy wyposażony jest we własny zbiornik oraz ogniwo paliwowe – jest to więc w istocie pojazd elektryczny, jest jednak tankowany wodorem, a jego ładowanie nie obciąża sieci elektroenergetycznej. Okresowo pojawiają się istotne dotacje, np. w 2021 roku w ramach programu Zielony Transport Publiczny autobusy wodorowe objęte były dotacją 90%.

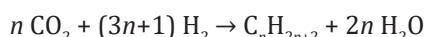
3. **Przemysł** – wodór jest obecnie wykorzystywany m.in. do produkcji amoniaku i hydrokrakingu ropy naftowej. Obecnie w tym celu w Polsce produkowanych jest 1,3 mln ton wodoru rocznie, głównie z gazu ziemnego, co odpowiada za istotną (ok. 20%) część krajowego zużycia gazu. Perspektywnie wodór może być też wykorzystywany w procesach hutniczych do redukcji rudy żelaza.

4. **Paliwa syntetyczne** – istnieje tu kilka możliwości:

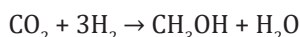
a) produkcja metanu (syntetycznego gazu ziemnego, SNG), reakcja Sabatiera:



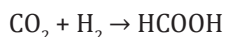
b) produkcja syntetycznego oleju napędowego (power-to-diesel), reakcja Fischera-Tropscha:



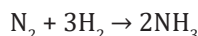
c) produkcja metanolu:



d) produkcja kwasu mrówkowego



e) produkcja amoniaku, reakcja Habera-Boscha



Jak łatwo zauważyć, wszystkie metody otrzymywania paliw syntetycznych, oprócz syntezy amoniaku, wymagają doprowadzenia czystego CO_2 . Przykładowo, aby otrzymać średni strumień SNG zaledwie ok. 50 Nm^3/h potrzeba 2,6 t/dobę czystego CO_2 , podczas gdy instalacja pilotażowego wychwytu CO_2 w *Elektrowni Łaziska* ma wydajność zaledwie 1,3 t/dobę [15]. Z tego względu ich realizacja w skali systemowej jest utrudniona.

5. **Zatłaczanie wodoru do sieci gazu ziemnego.** W przypadku braku innej możliwości odbioru, wodór może być zmieszany z gazem ziemnym i dystrybuowany do odbiorców gazu ziemnego. Proces ten wymaga uwzględnienia wymaganej jakości paliwa (ciepło spalania, liczba Wobbe-go) oraz zagadnień materiałowych, a zwłaszcza uwzględnienia poziomu wodoru dopuszczalnego przez najbardziej wrażliwe urządzenia i odbiorniki (zwłaszcza stacje CNG

oraz istniejące turbiny gazowe). W różnych krajach dopuszcza się różne udziały objętościowe wodoru, np. Niemcy – do 10%, Francja – do 6%, Austria – do 4%, Szwajcaria – do 2%, każdorazowo jednak decyzja należy do operatora danej sieci gazowej. Mieszanie wodoru z gazem ziemnym w zasadzie ogranicza jego dalsze użycie wyłącznie do spalania (cele energetyczne lub grzewczo-komunalne).

Metodyka oceny

Spośród omówionych technologii do oceny przyjęto procesy prawdopodobne do realizacji w najbliższej przyszłości zgodnie z Polską Strategią Wodorową w aspekcie dekarbonizacji gospodarki. Przyjęto, że ocenie podlega produkcja wodoru zielonego (odnawialnego) z energii wiatrowej (lub słonecznej), jego następna akumulacja w zbiornikach ciśnieniowych oraz wykorzystanie na cele energetyczne, transportowe, przemysłowe lub zatłaczanie do sieci gazowej.

Aby odpowiedzieć na pytanie, jakie korzyści przynosi zastosowanie wodoru w poszczególnych sektorach, zdefiniowano najpierw stan obecny poprzez wartości referencyjne, zestawione w tabeli 1. Dodatkowo, w tabeli 1 podano energochłonność produkcji tlenu w konwencjonalnej tlenowni.

Niektóre ze wskaźników wymagają dodatkowego omówienia: wskaźnik emisji CO_2 dla samochodów osobowych podano na podstawie oszacowania [17] o zasięgu europejskim, jest on znacznie wyższy od części publikowanego wskaźnika dla nowych samochodów (0,122 kg/km [18]), jednak niższy niż wartość szacowana dla USA (0,251 kg/km [19]).

W przypadku transportu autobusowego przyjęto, że istniejący tabor charakteryzuje się średnim zużyciem oleju napędowego 40 $\text{dm}^3/100 \text{ km}$, przy czym paliwo to charakteryzuje się wartością opałową 43 MJ/kg , gęstością 0,830 kg/dm^3 oraz udziałem masowym pierwiastka węgla $c = 0,85$. Na tej podstawie oszacowano energochłonność oraz emisję CO_2 (12 $\text{kg C} \rightarrow 44 \text{ kg CO}_2$).

Założone parametry łańcucha produkcji, magazynowania i wykorzystania wodoru scharakteryzowano w tabeli 2. Jeżeli nie zaznaczono inaczej, przyjęte parametry są wartościami typowymi dla danej technologii.

Tabela 1

Wartości referencyjne dla procesów potencjalnie zastąpionych przez wodór

Proces zastąpiony	Parametr	Wartość referencyjna	Źródło
Dostarczanie energii elektrycznej do odbiorców końcowych	wskaźnik emisji CO_2	$e_1 = 0,698 \text{ kg}/\text{kWh}$	Raport KOBIZE [16]
Transport (samochody osobowe)	energochłonność	$c_{2a} = 0,678 \text{ kWh}/\text{km}$	[20]
	wskaźnik emisji CO_2	$f_{2a} = 0,163 \text{ kg}/\text{km}$	wskaźnik rzeczywisty [17]
Transport (autobusy)	energochłonność	$c_{2b} = 3,966 \text{ kWh}/\text{km}$	obliczenia własne
	wskaźnik emisji CO_2	$f_{2b} = 1,035 \text{ kg}/\text{km}$	obliczenia własne
Przemysł (produkcja wodoru w reformingu parowym)	energochłonność	$c_3 = 40,37 \text{ kWh}/\text{kg}$	[8]
	wskaźnik emisji CO_2	$e_3 = 0,199 \text{ kg}/\text{kWh}$	[16]
Dostarczanie gazu ziemnego do odbiorców końcowych	wskaźnik emisji CO_2	$e_4 = 0,199 \text{ kg}/\text{kWh}$	[16]
Produkcja tlenu w konwencjonalnej tlenowni	energochłonność	$e_5 = 0,357 \text{ kWh}/\text{kg}$	[21]

Tabela 2

Parametry łańcucha produkcji, magazynowania i wykorzystania wodoru

Parametr	Wartość
Produkcja	
Moc OZE do wykorzystania	1 000 kW
Sprawność przesyłu energii elektrycznej	98%
Sprawność transformacji	98%
Moc napędowa elektrolizera	960 kW
Sprawność elektrolizera netto	64%
Produkcja wodoru	18,45 kg/h
Produkcja tlenu	146,42 kg/h
Strumień energii chem. wodoru	615 kW
Sprężanie/magazynowanie	
Ciśnienie H ₂ do samochodów osobowych	700 barów
Ciśnienie H ₂ do autobusów	350 barów
Ciśnienie H ₂ do pozostałych procesów	50 barów
Wskaźnik strat wodoru w całym łańcuchu	0,2%
Wykorzystanie	
Energetyka – ogniwo paliwowe; sprawność	50%
Energetyka – turbina gazowa w układzie prostym; sprawność	40%
Transport, samochód osobowy (Toyota Mirai II); zużycie paliwa	0,84 kg/100 km
Transport, autobus (Solaris Urbino 12); zużycie paliwa	10,5 kg/100 km

W przypadku przemysłu założono zastąpienie produkcji wodoru z reformingu parowego metanu, natomiast w przypadku załączania wodoru do sieci jego dalsze wykorzystanie jest takie samo jak gazu ziemnego, tj. na różnorodne cele technologiczne, grzewcze i komunalne.

Moc napędową sprężarek obliczono opierając się na modelu sprężania wodoru (gazu rzeczywistego) z wykorzystaniem bibliotek CoolProp, zakładając napęd elektryczny o sprawności 90%, sprawność mechaniczną napędu 95% oraz sprawność wewnętrzną 80%. W przypadku ciśnienia transportu 50 barów (energetyka, przemysł, gazownictwo) założono sprężanie jednostopniowe, dla autobusów i samochodów osobowych (350/700 barów) odpowiednio dwu- i trójstopniowe z chłodzeniem międzystopniowym.

Sprawność względnie efektywność procesu zdefiniowano nieco inaczej dla poszczególnych sposobów wykorzystania wodoru.

1. W przypadku wykorzystania energetycznego (1): sprawność procesu netto jest ilorazem odzyskanej mocy elektrycznej do mocy włożonej, przy czym moc napędową sprężarek traktuje się tak jak potrzeby własne elektrowni – odejmując od efektu użytecznego:

$$\eta_1 = \frac{N_{el,out} - \sum N_{sprężarek}}{N_{el, in}}$$

2. W przypadku transportu (2), przemysłu (3) i gazownictwa (4) efektem użytecznym jest energia chemiczna wodoru dostarczona do odbiorców:

$$\eta_{2,3,4} = \frac{\dot{E}_{chem,H_2} - \sum N_{sprężarek}}{N_{el, in}}$$

3. W przypadku transportu (2) i przemysłu (3) dodatkowo można określić systemową efektywność energetyczną, analizując zastąpioną przez wodór energię chemiczną paliwa/energiją napędową procesu:

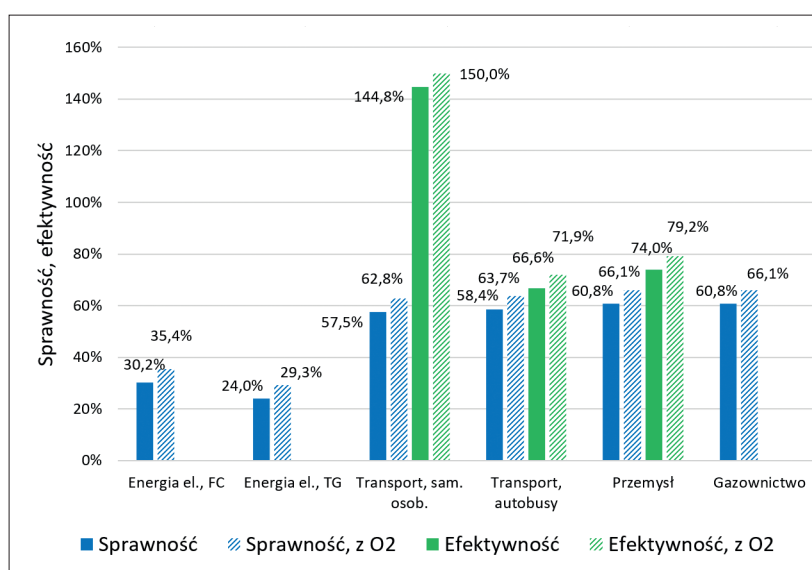
$$\varepsilon_{2,3} = \frac{\dot{E}_{zastąpiona} - \sum N_{sprężarek}}{N_{el, in}}$$

4. We wszystkich przypadkach do efektu (tj. do licznika sprawności/efektywności) może opcjonalnie zostać dodana zaoszczędzona energia na produkcję tlenu, jeżeli tlen z elektrolizy zostanie wykorzystany gospodarczo.

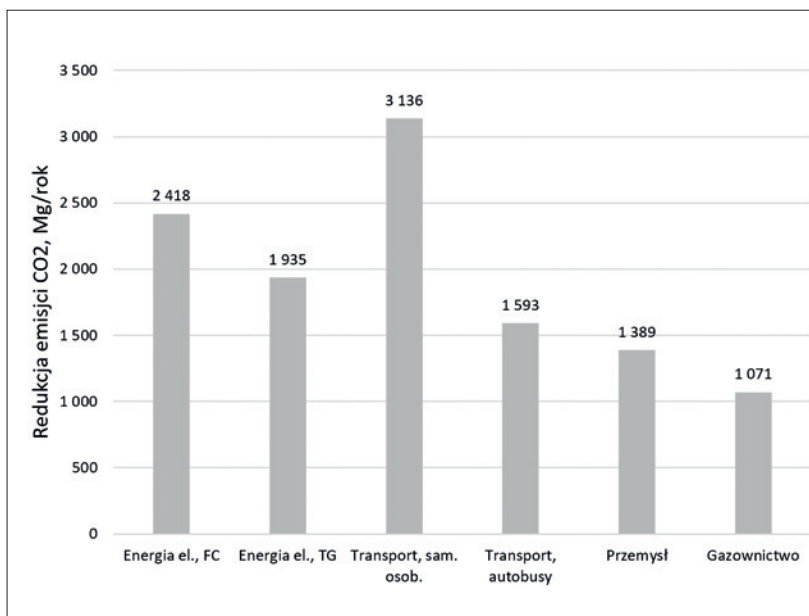
Wyniki

Syntetyczne zestawienie wyników ilustrują rysunki 1 i 2.

Porównanie energetyczne poszczególnych wariantów zagospodarowania wodoru nie jest oczywiste. Otrzymywane są różne postaci energii końcowej lub tylko nośników energii do dalszego wykorzystywania. Najniższa sprawność otrzymywania jest w przypadku produkcji energii elektrycznej, jednak w tym wypadku uzyskiwany jest nośnik końcowy wysokiej jakości. W pozostałych przypadkach do dyspozycji jest paliwo wodorowe, które podlega jeszcze dalszej konwersji. „Sprawność” najwyższa jest w przypadku przemysłu i gazownictwa z uwagi na przyjętą niższą wartość ciśnienia transportu wodoru, a najniższa dla samochodów osobowych, gdzie sprężanie wodoru do 700 barów zabiera ok. 3% energii chemicznej tego paliwa. Wykorzystanie tlenu (w innym wypadku produkowanego w tlenowni) poprawia sprawność o ok. 5 punktów procentowych.



Rys. 1. Sprawność i systemowa efektywność energetyczna wybranych wariantów zagospodarowania wodoru z opcjonalnym wykorzystaniem tlenu



Rys. 2. Redukcja emisji CO₂ wynikająca z całorocznej podaży mocy OZE 1 MW

Biorąc pod uwagę efekty systemowe, tj. obecny sposób zasilania samochodów osobowych, autobusów oraz obecny sposób produkcji wodoru w przemyśle, można wykazać wyższą efektywność wykorzystania wodoru. Szczególnie wysoką efektywność, przekraczającą 100%, można osiągnąć dla samochodów osobowych, co wynika z faktu, że energochłonność tego transportu jest ok. 2-krotnie niższa niż samochodów spalinowych. Niemniej jednak obliczona wartość może być zbyt optymistyczna, gdyż jest ona oparta na deklarowanym zużyciu samochodu Toyota Mirai II w wysokości zaledwie 0,84 kg H₂/100 km.

W przypadku emisji CO₂ najkorzystniejsze efekty osiąga się również dla samochodów osobowych, w dalszej kolejności dla energetyki, przemysłu, zaś najmniej korzystnym rozwiązaniem jest załączanie wodoru do sieci, gdyż zastąpienie gaz ziemny jest paliwem o stosunkowo niskiej emisji CO₂.

Wykazany na rysunku 2 efekt jest przykładowy, obliczony dla skali 1 MW x 8760 h; rzeczywisty efekt zależęć będzie od czasu dostępności mocy. Przedstawiony ranking rozwiązań zachowuje jednak swoją ważność.

Wnioski

Przedstawiona analiza, jakkolwiek ma charakter stosunkowo zgrubny, wskazuje na preferowane kierunki zastosowania wodoru produkowanego w procesie elektrolizy ze źródeł odnawialnych w warunkach polskich. Zarówno analiza energetyczna, jak też środowiskowa udowadnia, że największe korzyści daje zastosowanie wodoru w sektorze transportu, zwłaszcza w motoryzacji indywidualnej. Jest to istotne w aspekcie trudnej sytuacji na rynku paliw samochodowych. Samochody wodorowe są ważną alternatywą dla pojazdów elektrycznych, niemniej jednak do rozwiązania pozostają kwestie materiałowe (zapotrzebowanie na surowce jest nieco inne niż dla typowych samochodów elektrycznych, ale również problematyczne).

Zastosowanie wodoru jako akumulatora energii (finalna produkcja energii elektrycznej) jest niezbyt korzystne energetycznie, jednak również przyczynia się do dekarbonizacji gospodarki.

W dalszej kolejności rekomendować należy zastosowanie odnawialnego wodoru w przemyśle, zaś stosunkowo najmniej korzystne (co nie znaczy, że niepożądane) jest jego załączanie do sieci gazu ziemnego.

- [1] E. Rebhan (red.) *Energiehandbuch. Gewinnung, Wandlung und Nutzung von Energie*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg 2002.
- [2] Poland 2022. *Energy Policy Review*. International Energy Agency www.iea.org
- [3] CIRE – Centrum Informacji o Rynku Energii, na podstawie danych ENTSOE. www.cire.pl
- [4] Our World in Data: Carbon intensity of electricity 2021. www.ourworldindata.org
- [5] *Polska Strategia Wodorowa do roku 2030 z perspektywą do roku 2040*. Ministerstwo Klimatu i Środowiska, Warszawa 2021.
- [6] Chmielniak T., Chmielniak T. *Energetyka wodorowa*, PWN, Warszawa 2020.
- [7] Sun P., Elgowainy A., (2019) Updates of Hydrogen Production from SMR Process, <https://greet.es.anl.gov/>
- [8] Sánchez, RA et al. *Numerical modelling and simulation of hydrogen production via four different chemical reforming processes: Process performance and energy requirements*. “Canadian Journal of Chemical Engineering” 2016, 95 (5), pp. 880-901 DOI: 10.1002/cjce.22758.
- [9] Howarth, RW, Jacobson, MZ. *How green is blue hydrogen?* “Energy Sci Eng.” 2021, 9, 1676–1687, <https://doi.org/10.1002/ese3.956>
- [10] Ulejczyk B. et al. *Plasma-Catalytic Process of Hydrogen Production from Mixture of Methanol and Water*.
- [11] Bhandari R. et al. *LCA Assesment of Hydrogen Prod Methods – a Review*. Jülich IEK-STE.
- [12] Kostowski W. et al. *Effectiveness of the Hydrogen Production, Storage and Utilization Chain*. Chapter in: *Renewable Energy Sources: Eng. Technol. Innovation*. Springer 2018.
- [13] Şahin S, Şahin HM, *Generation-IV reactors and nuclear hydrogen production*, “International Journal of Hydrogen Energy” 2021, Vol. 46, Issue 57, pp. 28936-48, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.12.182>
- [14] <https://www.h2bulletin.com/knowledge/hydrogen-colours-codes/>
- [15] Stawinoga B., *Technologie Power-to-Gas – badanie efektu skali*. Projekt inżynierski (kier. W. Kostowski), Politechnika Śląska, Gliwice 2022.
- [16] Wskaźniki emisyjności CO₂, SO₂, NO_x, CO i pyłu całkowitego dla energii elektrycznej, grudzień 2021. Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami – raport.
- [17] Thietge U. et al. *From laboratory to road. A 2018 update of official and real-world fuel consumption and CO₂ values for passenger cars in Europe*. ICCT White Paper 2019.
- [18] Emisje CO₂ z samochodów: fakty i liczby. Parlament Europejski 2019. <https://www.europarl.europa.eu/news/pl/headlines/society/20190313STO31218/emisje-co2-z-samochodow-fakty-i-liczby-infografiki>
- [19] *Greenhouse Gas Emissions from a Typical Passenger Vehicle*. EPA – United States Environ. Protection Agency, 2022 <https://www.epa.gov/greenvehicles/greenhouse-gas-emissions-typical-passenger-vehicle>
- [20] Energy consumption of cars per km. Portal www.odyssee-mure.eu
- [21] Aneke M., Wang M., *Potential for improving the energy efficiency of cryogenic air separation unit (ASU) using binary heat recovery cycles*, “Applied Thermal Engineering” 2015, Vol. 81, Pages 223-231 <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.02.034>.

