

# Power-to-Gas świętym graalem racjonalnej transformacji energetycznej w Polsce

## Power-to-Gas as the holy grail of rational energy transformation in Poland

Szymon Kowalski\*)

**Słowa kluczowe:** wodór, integracja sektorów, Power-to-Gas, modele biznesowe, OZE, sector coupling, gaz ziemny, magazynowanie energii

### Streszczenie

W artykule dowiedziono tezy stanowiącej, iż projekty Power-to-Gas w warunkach gospodarczych Polski są technicznie i ekonomicznie uzasadnione. Za sprawą integracji sektorów (ang. sector coupling) odbywającej się w praktyce poprzez wdrażanie projektów opartych na koncepcji P2G, możliwe jest zwiększenie niezawodności dostaw energii, zdywersyfikowanie jej źródeł oraz redukcja emisyjności, a w rezultacie przeprowadzenie procesu transformacji energetycznej w Polsce w sposób ekonomicznie i technologicznie racjonalny, pomimo wyzwań, aktualnego, krajowego miksu energetycznego oraz ogólnej złożoności zagadnienia.

**Keywords:** hydrogen, Power-to-Gas, business models, RES, sector coupling, natural gas, energy storage

### Summary

The article proves the thesis that Power-to-Gas projects are technically and economically justified in the economic conditions of Poland. Due to sector coupling in practice by implementing projects based on the P2G concept, it is possible to increase the reliability of energy supply, diversify its sources and reduce emissions, and as a result, carry out the energy transformation process in Poland in a manner economically and technologically rational, despite the challenges, the current national energy mix and the general complexity of the issue.

## 1. Wprowadzenie

W obliczu aktualnych wyzwań, z jakimi przyszło mierzyć się podmiotom odpowiedzialnym za kreowanie założeń polityki energetycznej podjęto rozważania dotyczące problematyki konwersji odnawialnej energii elektrycznej na chemiczne nośniki energii, w tym przede wszystkim wodoru. Zasadniczym celem artykułu jest analiza techniczno-ekonomiczna możliwości wdrażania projektów opartych na technologii Power-to-Gas w krajowym systemie energetycznym i ocena słuszności potencjalnego rozwoju. Szczególna uwaga poświęcona jest także aspektom biznesowym wspomnianych koncepcji. Poruszono zagadnienia dotyczące systemu energetycznego, źródeł zaopatrzenia w wodór, metanizacji oraz integracji sektorów. Dokonano badań w obszarze aktualnego stanu wiedzy dotyczącej koncepcji P2G, prowadzonych, faktycznych działań badawczo-rozwojowych, a także przyszłych, potencjalnych wyzwań. Przeprowadzono następnie analizę modeli biznesowych technologii P2G w wymiarze ekonomicznym i systemowym a także dokonano oceny możliwości ich wdrożenia w realiach Polski (analiza SWOT) z uwzględnieniem aktualnej strategii energetycznej (wodorowej) Unii Europejskiej.

## System Energetyczny

### 1.1 Krajowy System Elektroenergetyczny i rynek energii elektrycznej

Zestaw urządzeń, których działanie ma na celu wytwarzanie, przesyłanie, rozdział, magazynowanie oraz użytkowanie energii elektrycznej w Polsce, składa się na Krajowy System Energetyczny (KSE). Urządzenia połączone są funkcjonalnie względem siebie w system, co umożliwia ciągłe

i nieprzerwane zapewnienie dostaw. Na KSE składa się system wytwórczy (elektrownie), sieć przesyłowa oraz sieć dystrybucyjna. Stan posiadanej sieci przesyłowej NN na 31 grudnia 2019 r. to [21]:

- 269 linii o łącznej długości 14 692 km, w tym:
  - 1 linia o napięciu 750 kV o długości 114 km,
  - 104 linie o napięciu 400 kV o łącznej długości 7 008 km,
  - 164 linie o napięciu 220 kV o łącznej długości 7 570 km,
- 107 stacji najwyższych napięć (NN)
- podmorskie połączenie 450 kV DC Polska – Szwecja o całkowitej długości 254 km (z czego 127 km należy do PSE S.A.).

W związku z faktem, iż zakres połączeń sieci elektrycznych ulega ciąglemu zwiększaniu, koniecznym okazuje się zapewnienie równowagi między podażą a popytem na energię elektryczną. Zasadniczą rolę odgrywają tutaj giełdy rynkowe, na których ustalana jest cena w zależności od kryteriów lokalnych, jak chociażby wysokością popytu czy nadwyżkami produkcji. W zależności od ustawodawstwa poszczególnych krajów, giełdy są pozostawione arbitrazom między dostawcami a kupującym bądź regulowane przez uprawnione podmioty [1].

W Polsce, zasady, w ramach których funkcjonuje krajowy rynek energii objęte zostały w ustawie Prawo Energetyczne (z dnia 10 kwietnia 1997 r.) a także powiązanych z nią aktach wykonawczych. Dokumenty te nie przewidują szczególnych ograniczeń w kształtowaniu odrębnych mechanizmów handlu energią. Obecnie polski rynek energii podzielony jest na trzy fundamentalne segmenty, do których należą rynek giełdowy, rynek kontraktowy i rynek bilansujący [22].

Wolumen krajowej produkcji energii elektrycznej brutto w 2019 r. wyniósł 158 767 GWh (spadek o 3,9% w porównaniu z 2018 r.). W tym samym

\*) Szymon Kowalski, Absolwent energetyki (I st. - Politechnika Wrocławska), inżynierii gazownictwa (II st. - Politechnika Warszawska) i zarządzania projektami (II st. - Akademia Leona Koźmińskiego & SKEMA Business School w Lille). Energy Portfolio Specialist w Departamencie Zarządzania Portfelem Energii w międzynarodowym koncernie energetycznym.

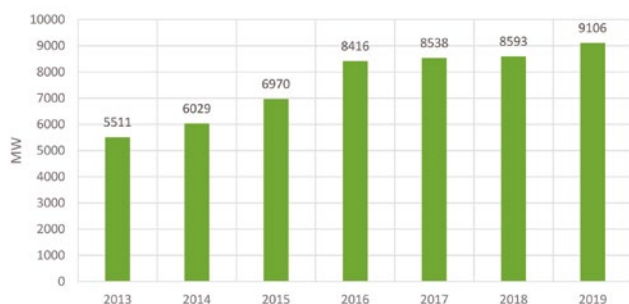
okresie krajowe zużycie energii elektrycznej brutto wyniosło 169 391 GWh i zmniejszyło się o 0,9% w porównaniu do 2018 r. [23].

## 1.2 Energia ze źródeł odnawialnych

W ostatnich latach zaobserwowano dynamiczny wzrost udziału energii z źródeł odnawialnych. Ważną rolę w tej ekspansji odegrały różnego rodzaju dotacje rządowe. Do dziś jednak negatywnym aspektem pozostaje produkcja niezwiązana ze zużyciem zależnym od warunków meteorologicznych (wiatr i słońce) stąd potrzeba zoptymalizowanego zarządzania, wciąż połączonego z dostępnymi nieodnawialnymi źródłami w celu zbilansowania produkcji na drodze ku zaspokojeniu popytu.

### Potencjał krajowy OZE

Z danych opublikowanych przez Urząd Regulacji Energetyki na dzień 31.12.2019 wynika, iż w ciągu 2019 r. przyrost mocy z OZE jest ponad dziewięciokrotnie większy aniżeli rok wcześniej. Zaobserwowano także ogólny wzrost mocy zainstalowanej o przeszło 512 MW [25]. Na rysunku 1 porównano zainstalowaną moc OZE ogółem w latach 2013-2019.



Rys. 1 Moc zainstalowana OZE ogółem, w latach 2013-2019 [oprac. własne na podst. danych URE]  
Figure 1. Total installed RES capacity in 2013-2019 [own study based on data of the Energy Regulatory Office]

Na rysunku 2 przedstawiono strukturę zainstalowanej mocy OZE zaś na rysunku 3 zestawiono liczbę instalacji OZE według rodzaju źródła (stan na 31.12.2019 r.).

Jeśli chodzi o strukturę według źródła, wówczas największy udział przypada instalacjom wiatrowym. Kształtuje się ona na poziomie 65% całościowej ilości mocy zainstalowanej. Moc z instalacji biomasowych i wodnych to odpowiednio 16% i 11% zaś fotowoltaicznych i biogazu to 5% i 3%. Warto zauważyć, że prym wśród zainstalowanych instalacji OZE wiodą instalacje wiatrowe oraz fotowoltaiczne, których na koniec 2019 r. było odpowiednio 1207 i 1104.

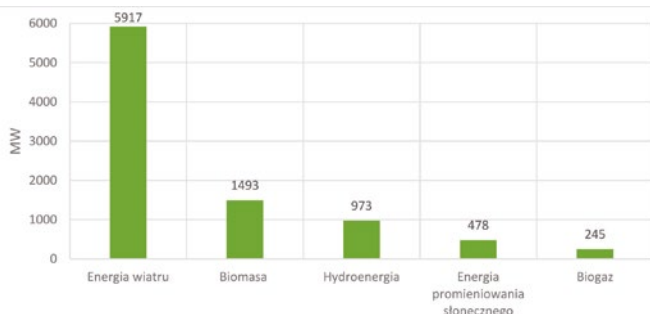
Przewaga komparatywna związana z wytwarzaniem energii elektrycznej z OZE w zestawieniu z źródłami konwencjonalnymi wynika przede wszystkim z:

- braku konieczności importowania paliw, tak jak ropa czy gaz ziemny,
- umożliwieniem zwiększenia samowystarczalności energetycznej,
- zmniejszenia bilansu płatniczego (mniejszy deficyt handlowy).

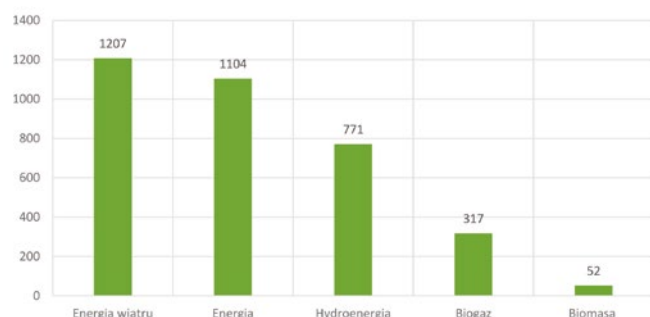
W kontekście Power-to-Gas szczególną uwagę poświęcana jest instalacjom wiatrowym i fotowoltaicznym. Należy zauważyć, że technologie te charakteryzują się przede wszystkim nieciągłością i zmiennością, co nie obserwuje się w przypadku chociażby energii ze źródeł wodnych czy geotermalnych.

Koncepcje magazynowania energii, takie jak P2G z wodorem, mogą znacząco przyczynić się do zaspokojenia potrzeb kraju w zakresie zarządzania energią poprzez:

- umożliwienie wykorzystania odnawialnych źródeł energii, takich jak wiatr i słońce w znacznie większej skali [5],
- efektywne wykorzystanie energii w zakresie obciążenia podstawowego poza szczytem, a tym samym poprawa emisji w cyklu życia z sektorów wytwarzania energii i transportu [18].



Rys. 2 Moc zainstalowana OZE według rodzaju źródła [oprac. własne na podst. danych URE]  
Figure 2. Installed RES capacity by source type [own study based on data of the Energy Regulatory Office]



Rys. 3 Liczba instalacji OZE według rodzaju źródła [oprac. własne na podst. danych URE]  
Figure 3. Number of RES installations by source type [own study based on data of the Energy Regulatory Office]

## 1.3. System gazowniczy

W strukturę sektora gazu ziemnego w Polsce wpisują się podmioty prowadzące następujące rodzaje działalności: dystrybucja, przesył, obrót, magazynowanie, poszukiwanie i wydobycie. Na system przesyłowy gazu w Polsce składają się: gazociągi przesyłowe (sumaryczna długość przekracza 9,7 tys. km), 56 węzłów gazowniczych, 14 tłocznii, 974 punkty wyjścia. URE donosi, iż w roku 2019 zakup gazu pochodzącego z źródeł zagranicznych, przy wolumenie 169,1 TWh, uzupełniany gazem z zasobów krajowych przy wolumenie 42,5 TWh. Całkowite dostawy gazu z zagranicy w 2019 r. obejmowały import oraz nabycie wewnątrzwspólnotowe. W 2019 r. nadal istotną część stanowił import z kierunku wschodniego, realizowany w ramach długoterminowego kontraktu zawartego pomiędzy PGNiG S.A. a Gazprom. W krajowym systemie przesyłowym przepłynęło 8,4 TWh oraz 557,6 TWh odpowiednio gazu zaazotowanego i wysokometanowego. Zdecydowana większość wysokometanowego gazu przetransportowana była poprzez tranzyt wykorzystując gazociąg jamalski [23].

## 2. Technologie elektrolizy wody

Na wstępie należy pamiętać, że wodór nie jest źródłem energii, ale wtórnym nośnikiem energii, który oferuje szeroki zakres korzyści. Nadwyżka energii elektrycznej może zostać wykorzystana do produkcji wodoru poprzez elektrolizę wody. H<sub>2</sub> można z kolei przekształcić w metan za pomocą odpowiedniego źródła węgla, bezpośrednio wtryskiwać do sieci gazowej bądź też stosować w pojazdach z ogniwami paliwowymi. Nowe wyzwania, z którymi trzeba mierzyć się ze względu na masową integrację odnawialnych źródeł energii, takie jak np. właściwa praca systemu, wyrównanie obciążenia, zarządzanie generacją rozproszoną lub magazynowanie i wykorzystanie nadwyżek energii, mogą zostać okiełznane za sprawą koncepcji P2G. Elektroliza wody to fundamentalny etap na drodze wspomnianego łańcucha z uwagi na powiązanie energii chemicznej z elektryczną. Wśród najistotniejszych wymagań dotyczących elektrolizerów wymienić należy [8]:

- wysoce dynamiczne tryby pracy i wysokie zdolności produkcyjne,
- szerokie zakresy obciążenia częściowego o wystarczająco wysokiej wydajności i satysfakcjonującym poziomie czystości gazu,
- wysokie gęstości mocy jednostkowej i niskie inwestycyjne koszty operacyjne.

Pomimo, że elektroliza wody jest już dobrze ugruntowaną technologią, konieczne są dalsze ulepszenia i badania w celu spełnienia tych wymagań. W łańcuchach procesowych P2G należy zwrócić uwagę na trzy technologie elektrolizy: elektroliza alkaliczna (AEL), elektroliza membranowa z polimerowym elektrolitem (PEM) oraz elektroliza z elektrolitem stałym (SOEC), przy czym każda z nich pozostaje na innym poziomie zaawansowania rozwojowego. Istotne różnice techniczne między nimi to temperatura robocza, gęstość prądu i odpowiadające mu napięcie, klasa materiałów użytych do katalizy, wartość pH oraz rodzaj zastosowanego elektrolitu, a tym samym konfiguracja poszczególnych układów elektrolizera [1]. Porównanie parametrów operacyjnych zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1 Kluczowe parametry operacyjne elektrolizerów AEL, PEM, SOEC [8,4]  
Table 1. Key operating parameters of AEL, PEM, SOEC electrolyzers [8,4]

	AEL	PEM	SOEC
Elektrolit	Roztwór alkaliczny	Stała membrana polimerowa	Ceramika ZrO <sub>2</sub> domieszkowana Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Nośnik ładunku	OH <sup>-</sup>	H <sub>3</sub> O <sup>+</sup> /H <sup>+</sup>	O <sup>2-</sup>
Ciśnienie robocze (bar)	<30	<200	<25
Temperatura [°C] [4] [8]	40-90 60-80	20-100 60-80	800-1000 700-1000
Gęstość prądu (A/cm <sup>2</sup> )	<0.5	>1	<0.3
Napięcie ogniwa [V] [4] [8]	1.8-2.4 >1.9	1.8-2.2 >1.8	0.91-1.3 >1
Zużycie energii [kWh/m <sup>3</sup> H <sub>2</sub> ] [4] [8]	4.5-8.2 >4.6	4.5-7.5 >4.8	- <3.2
Wydajność (scbm H <sub>2</sub> )	<760	<40	<5

Najwyższy potencjał wydajnościowy posiada technologia elektrolizy wysokotemperaturowej (SOEC). Jest to jednak obecnie najslabiej rozwinięta technologia i powoduje poważne problemy z degradacją materiałów, w związku z czym, należy prowadzić dalsze badania.

Elektrolizery AEL są najstarszą, obecnie najbardziej dojrzałą i najtańszą dostępną technologią. W dużych zakładach elektrolitycznej produkcji wodoru dotychczas stosowane są wyłącznie elektrolizery alkaliczne. Jednak małe gęstości prądu i raczej ograniczone tryby dynamicznej pracy są obecnie głównymi ograniczeniami tej technologii. Aby uczynić technologię AEL bardziej kompatybilną z zastosowaniami P2G, również konieczne są dalsze udoskonalenia [8].

Technologia PEM poczyniła znaczący postęp w ostatnim czasie i jest na najlepszej drodze do opuszczenia niszowych zastosowań. Ze względu na różne unikalne zalety w stosunku do systemów AEL, takie jak kompaktowa konstrukcja systemu, wysokie gęstości prądu, wysokie ciśnienia robocze, duża elastyczność w odniesieniu do trybów pracy i szerokie zakresy obciążenia częściowego, oferuje duży potencjał, aby stać się poważnym konkurentem dla elektrolizerów AEL. Ze względu na te zalety technologia PEM jest obecnie prawdopodobnie najbardziej odpowiednią technologią dla zastosowań P2G. Najistotniejsze ograniczenia tej technologii to jej wysokie koszty, ograniczone zasoby i brak odpowiednich procedur zwiększania skali.

Niezależnie od konkretnej technologii elektrolizy wody, głównymi wadami są ograniczone możliwości obecnie dostępnych elektrolizerów, nieoptymalne zachowania związane z degradacją i stosunkowo wysokie inwestycje w koszty operacyjne systemów elektrolizerów. W przypadku każdej z technologii elektrolizy wody konieczne są nadal znaczne wysiłki badawczo-rozwojowe, aby przezwyciężyć te problemy i utowarować drogę do szerszego wprowadzenia na rynek produkcji wodoru elektrolitycznego [8].

### 3. Metanizacja

Proces metanizacji może przebiegać w reaktorach katalitycznych oraz biologicznych. Aby porównać obie metody należy zwrócić uwagę na następujące kwestie [4]:

- Objętość reaktora potrzebna do osiągnięcia wymaganej jakości gazu i przepływu objętościowego
- Złożoność konfiguracji procesu
- Osiągalna jakość gazu produktu gazowego

Zestawienie całkowitych godzinowych znormalizowanych objętościowych natężeń przepływu gazu (GHSV – Gas Hourly Space Velocity) różnych modeli reaktorów, to jeden z dostępnych sposobów porównywania ich wydajności. W metodzie tej wykorzystywany jest wzór:

$$GHSV = \frac{F_{V,G,in}}{V_R}$$

Gdzie:

$F_{V,G,in}$  – szybkość przepływu objętościowego gazu (zasilającego bez żadnych gazów obojętnych i ze stechiometrycznym stosunkiem H<sub>2</sub> / CO<sub>2</sub>)

$V_R$  – objętość reaktora

Nie ulega wątpliwości, że reakcja metanizacji jest wysoce egzotermiczna. W celu zwiększenia zatem jej wydajności w procesowym łańcuchu P2G, niezbędnym jest wykorzystanie ciepła pochodzącego z reakcji.

Istotne znaczenie w kontekście ponoszonych nakładów finansowych ma wielkość reaktora. Wartościowe okazuje się zatem zestawienie wymagań w tym zakresie w obu przypadkach metanizacji. Za sprawą omówionego wcześniej GHSV, możliwym staje się porównywanie koniecznych objętości reaktora w sposób bezpośredni. Należy jednak pamiętać, iż wskaźnik ten jest porównywalny tylko w przypadku jednoczesnego zestawiania podobnych współczynników konwersji. W tym celu, założona została konwersja, która prowadzi do ponad 90% zawartości CH<sub>4</sub> w produkcie gazowym [4].

Z przeprowadzonych badań wynika, iż metanizacja katalityczna (ze złożem stałym) zachodzi znacznie szybciej niż ma to miejsce w przypadku biologicznej. W przypadku ostatniej z wymienionych, wiąże się to z koniecznością wykorzystania kilkukrotnie większego reaktora do konwersji tej samej ilości gazu zasilającego. Maksymalna wartość GHSV to 100 h<sup>-1</sup> oraz 2000-5000 h<sup>-1</sup> kolejno dla metanizacji biologicznej i katalitycznej [4]. Tak znaczące różnice między wartościami GHSV w obu koncepcjach związane są z: temperaturą, przenoszeniem masy cieczy i gazu, mieszaniami wstecznym. W kontekście parametrów technicznych, wielkość reaktora to tylko jeden z elementów niezbędnych przy porównywaniu koncepcji. Dynamiczne działanie metanizacji w łańcuch P2G wymaga bowiem jeszcze zwrócenia szczególnej uwagi na szybkość zmiany obciążenia i jego minimalną wartość. Można znacząco zredukować nakłady na magazynowanie H<sub>2</sub>, gdy tylko reaktor jest wystarczająco elastyczny [4].

W ostatnim czasie metanizacja biologiczna badana była głównie w skali laboratoryjnej lub poprzez projekty pilotażowe. Największe wyzwanie stanowi odpowiednie mieszanie w reaktorze dużej skali przy jednoczesnym zaopatrywaniu we właściwą ilość H<sub>2</sub>. Podstawowe aspekty, które mają wpływ na zwiększanie skali w tym przypadku to hydrodynamika oraz mieszanie wstępne. Powody, dla których metanizacja biologiczna jest odpowiednia dla instalacji mniejszej skali są następujące [4]:

- usprawnione oczyszczanie gazu ze względu na dużą tolerancję zanieczyszczeń,
- uproszczenie procesu za sprawą niskiej temperatury, przy czym niewiele możliwości wykorzystania ciepła odpadowego,
- konieczność stosowania reaktorów o dużej objętości.

Dla porównania, metanizacja katalityczna jest dobrze znana w przemyśle i stosowana na szeroką skalę. W dużej skali (>100 MW) optymalna jest metanizacja w złożu stałym. Konfiguracja procesu jest wówczas dość złożona, ale można wytwarzać wartościową parę wodną. Z drugiej strony, dla instalacji średniej wielkości optymalne są koncepcje izotermicznej metanizacji katalitycznej tj. trójfazowa lub ze złożem fluidalnym. Konfiguracja procesu jest wtedy stosunkowo prosta, co więcej można wykorzystać ciepło odpadowe [4].

## 4. Ekonomia i łańcuchy procesowe koncepcji Power to Gas

Z uwagi na możliwość oferowania znacznych korzyści dla całego systemu energetycznego, wymiar ekonomiczny koncepcji P2G jest zagadnieniem dość złożonym. Analiza ekonomiczna P2G związana jest zatem z koniecznością przeprowadzenia zarówno szczegółowych analiz systemowych i makroekonomicznych jak również analizy biznesowej. Kombinacja tych aspektów pozwoli na kompleksową ocenę charakterystyki ekonomicznej P2G [8].

### Źródła węgla

Zastosowanie technologii P2G wiąże się z koniecznością wykorzystania źródeł węglowych w postaci dwutlenku węgla lub tlenku węgla. Znane jest już pozyskiwanie CO<sub>2</sub> w procesie sekwestracji polegające na oddzieleniu i wychwyceniu dwutlenku węgla ze spalin przede wszystkim w celu ograniczenia jego emisji do atmosfery. W odniesieniu jednak do P2G, do przebiegu CCS (ang. carbon capture and storage) niezbędne są duże, stacjonarne źródła CO<sub>2</sub>, jak na przykład rafineria czy elektrownia. Źródłem CO<sub>2</sub> może być także przemysł stali, żelaza i cementu. To właśnie ten sektor generuje największą ilość dwutlenku węgla wymagając jednocześnie konieczności sekwestracji, aby usunąć ślady zanieczyszczenia w procesie metanizacji, np. siarki. Obligatoryjność usuwania dwutlenku węgla wiąże się z wzrostem kosztów oraz obniżeniem efektywności energetycznej. P2G z kolei nie wymaga tak znacznych źródeł węgla [4].

### 4.1 Oddziaływania systemowe i makroekonomiczne

Obecnie opracowywane strategie energetyczne państw w dużej mierze opierają się na koncepcji zrównoważonego systemu energetycznego przy jednoczesnym ograniczaniu zależności od importu paliw kopalnych. Ze względu na obowiązujące normy międzynarodowe, nieunikniony jest wzrost udziału źródeł odnawialnych w krajowych mikсах energetycznych. Spełnienie tych celów środowiskowych poprzez integrację energii odnawialnej zwłaszcza w zakresie produkcji energii elektrycznej, stanowi wyzwanie dla współczesnych gospodarek narodowych przede wszystkim w kontekście potrzeby zapewnienia bezpieczeństwa dostaw na wysokim poziomie. W szczególności wyzwanie to związane jest z silnymi wahaniami podaży energii odnawialnej pochodzącej ze źródeł niestabilnych takich jak energia słoneczna i wiatrowa. Wskutek wzrostu udziału odbiorców końcowych, niezbędne jest zapewnienie równowagi pomiędzy okresami niedoborów mocy a tymi, w których następuje nadwyżka w czasie wysokiego poziomu jej wytwarzania [8].

Obok procesu optymalizowanego zarządzania energią, zakłada się, iż strategiczną rolę odgrywać będą systemy magazynowania energii. To właśnie konwersja wodoru i metanu w technologii P2G odpowiada ogólnosięciowym prognozom w zakresie przyszłego, długoterminowego zastąpienia w strukturze pierwotnych nośników energii. Spekuluje się utratę na znaczeniu jako źródeł energii paliw stałych takich jak węgiel, uran, biomasa czy też jej płynnych form w postaci chociażby ropy naftowej wobec wzrostu rozwojowego skierowanego ku gospodarce wodorowej [8].

W analizie makroekonomicznej, w kontekście wdrażania nowej technologii niezbędne jest zadanie sobie pytania o jej opłacalność w chwili obecnej. Wdrażanie technologii powinno mieć miejsce w przypadku uzasadnienia biznesowo-gospodarczego a realizacja penetracji rynku jest wymuszona przez ekonomiczną niezawodność. Otwiera się zatem tutaj pole dla technologii P2G [8]. Nie ulega wątpliwości, że poprzez rozwój wiedzy i technologii oraz za sprawą udoskonalania i optymalizacji systemu energetycznego, możliwym jest uzyskanie poprawy ekonomicznej tegoż systemu.

### Power to Gas w kontekście alternatywnych systemów magazynowania

Obecnie rynki energii niemalże na całym świecie borykają się z wysokim wskaźnikiem wzrostu energii słonecznej i wiatrowej. Narastający jest w rezultacie problem wahań produkcji w zależności od czasu. Wahania te występują przy stosunkowo ograniczonej ich przewidywalności. Wiąże się to z koniecznością odprowadzania występujących lokalnie nadwyżek poprzez odpowiednio przystosowaną infrastrukturę sieciową. Okazuje się

jednak, że pomimo rozbudowy sieci przesyłowych stwarzającej okazję do równoważenia wahań produkcji energii ze źródeł odnawialnych i kompensacji sieci, to i tak podejście to jest technologicznie problematyczne oraz niewystarczająco uzasadnione ekonomicznie [8].

Dynamika rozwoju generowania energii ze źródeł odnawialnych przyczynia się do wzrostu wymagań operacyjnych i strukturalnych w zakresie systemu produkcyjnego. W kontekście integracji ograniczonego i w dużej mierze zmiennego zakresu prognozowania produkcji energii z elektrowni słonecznych i wiatrowych, wymagane jest ogólnie przystosowanie systemu energetycznego na szczeblach od lokalnego po transnarodowy [8].

Powszechnie wiadomo, iż integrowanie wskaźnika fluktuacji energii odnawialnej jest ograniczone poprzez struktury organizacyjne i techniczne systemu zasilania. Niezbędna okazuje się zatem odpowiednia adaptacja tego systemu aby poprzez skoordynowanie produkcji energii odnawialnej z popytem oraz dostępnymi możliwościami sieci i magazynowania, zagwarantować zrównoważone, opłacalne ale przede wszystkim także bezpieczne dostawy energii elektrycznej w perspektywie długoterminowej. Możliwym jest osiągnięcie tego w rezultacie integracji gazowych systemów zasilania z systemami magazynowania energii chemicznej [8].

Zaletą pompowych systemów magazynowych prócz osiągnięcia swojej dojrzałości technologicznej wydaje się zdecydowanie wyższa wydajność niż systemów P2G. Wadą zaś jest uzależnienie w wysokim stopniu od lokalizacji z uwagi na konieczność zapewnienia różnicy poziomów między dolnym i górnym zbiornikiem a także przywołane wcześniej trudności z akceptacją ze strony społeczeństwa. Przewaga technologii P2G nad elektrowniami szczytowo-pompowymi to z kolei znacznie wyższy potencjał pod względem możliwości operacyjnych, przez które rozumieć można wysokie zdolności magazynowe w perspektywie długoterminowej. Niestety ze względu na ograniczone możliwości magazynowania z wykorzystaniem systemów pompowych, konieczne jest wprowadzanie także innych magazynowych rozwiązań technologicznych. Są one jednak albo dopiero w fazie demonstracyjnej i w trakcie rozwoju albo na etapie wstępnego, komercyjnego wprowadzania. Wśród nich wyróżnić można: superkondensatory, cewki nadprzewodzące, zbiorniki sprężonego powietrza, masy wirujące czy zbiorniki akumulatorowe dużej skali [8].

### Zasilanie gazem przy budowie sieci hybrydowych

W ostatnim czasie na horyzoncie energetycznym pojawiła się nowa koncepcja wykorzystania P2G. Mowa tutaj o figurowaniu tej technologii jako czołowego elementu rozwoju sieci hybrydowych rozumianych jako systemu złożonego z różnych systemów energetycznych, które połączone są dwukierunkowo, charakteryzując się całościowo wysokim poziomem zintegrowania. Zakłada się, iż tworzenie sieci hybrydowych ma fundamentalne znaczenie w kontekście funkcjonowania systemu energetycznego zarówno pod względem ekonomicznym, jak i zachowania bezpiecznych dostaw energii. W nawiązaniu do ostatniego z wymienionych, faktem jest zagwarantowanie lepszego zarządzania obciążeniem oraz magazynowania energii z innych sieci za sprawą stosowania sieci hybrydowych. Pod względem ekonomii, sieci hybrydowe zapewniają wzrost efektywnego gospodarowania zasobami oraz ograniczają intensywność rozbudowy pojedynczych sieci [8].

Dzięki wdrożeniu sieci hybrydowych, możliwa jest w niedalekiej przyszłości optymalna integracja wszystkich sieci energetycznych, czyli elektrycznych, gazowych, ciepłych, transportowych oraz zaopatrzenia w wodę. Taka kompleksowa integracja stwarza doskonałe warunki do podejmowania nadrzędnych decyzji w kontekście planowania strategii energetycznej, umożliwiając tym samym dalszy rozwój systemu energetycznego.

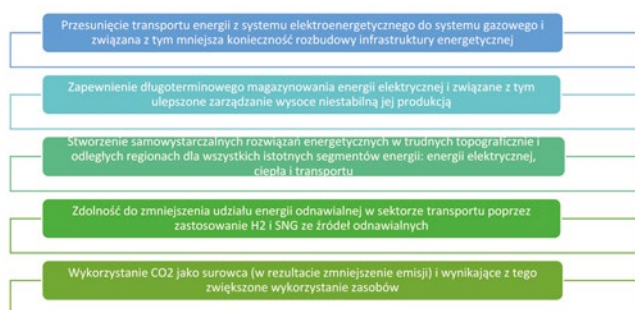
Ostatnie lata przyniosły dynamiczny rozwój technologii komunikacyjnych i informacyjnych stwarzając zupełnie nowe możliwości również w energetyce. Technologie interfejsowe są w stanie w dużym stopniu integrować różne sieci energetyczne, sprzężone dwukierunkowo, w jeden kompatybilny system. Wyjątek nie stanowią tutaj niestabilne źródła energii takie jak ogniva PV czy elektrownie wiatrowe bowiem można również i je integrować w ramach sieci hybrydowych. Zastosowanie technologii P2G w tym kontekście prowadzi do zwiększonej wydajności energii pierwotnej w niektórych podsegmentach systemu energetycznego i poprawy jego rentowności jako całości [8].

Warto zauważyć, że paliwa odnawialne w postaci H<sub>2</sub> lub SNG, które pochodzą z energii fotowoltaicznej, wiatrowej, geotermalnej czy też wodnej, w zestawieniu z biopaliwami I generacji, nie konkurują o zasoby biogenne, które alternatywnie można wykorzystywać np. do produkcji żywności. Można rozumieć przez to zwiększoną efektywność wykorzystania zasobów za sprawą zastąpienia paliw biogenych I generacji technologią P2G w obszarze mobilności [8].

## 4.2 Power-to-Gas w łańcuchach procesowych

Znaczenie Power-to-Gas w ujęciu systemowym i makroekonomicznym pozwala sądzić, że zastosowania tej technologii nie należy zawężać jedynie do opcji magazynowania, bowiem tkwi w niej dużo większy potencjał jeśli chodzi o transport energii. W szerokim znaczeniu system P2G to procesy i technologie, w których wytwarzany jest wodór z energii elektrycznej. Gdy towarzyszy im CO<sub>2</sub>, wówczas otrzymywany jest metan. Przemiana kojarzona z terminem 'Power to Gas' ograniczona jest do produkcji H<sub>2</sub> i CH<sub>4</sub>. Gdy zaś mamy do czynienia z innymi formami przekształcania energii elektrycznej w węglowodory, jak np. CH<sub>3</sub>OH, wówczas częściej wykorzystywane pojęcia to 'Power to Liquid' lub 'Power to Fuel'.

Na rysunku 4 podsumowano korzyści potencjalnie czerpane z rozwiązań technologicznych P2G. Możliwości te implikują szeroki wachlarz form łańcuchów procesowych i modeli biznesowych o różnych punktach odniesienia w systemie energetycznym. Stwarza to sposobność zwartej analizy zarówno obecnych jak i przyszłych modeli w zakresie konkurencyjnych rozwiązań technologicznych i kompatybilności systemu. Z tym z kolei, wiąże się konieczność analizy ekonomicznej konkretnego zastosowania systemu P2G [8].



Rys. 4. Korzyści z rozwiązań Power to Gas [8]

Fig. 4. Benefits of Power to Gas solutions [8]

## 4.3 Ekonomia w systemie Power to Gas

### Nakłady inwestycyjne

Analiza nakładów inwestycyjnych (kapitałowych) powszechnie określaną także jako CAPEX (ang. capital expenditures) w kontekście wdrożenia systemu Power to Gas wiąże się z uwzględnieniem następujących etapów na drodze procesu [4]:

- Elektroliza
- Magazynowanie wodoru i sprężanie wodoru (opcjonalnie)
- Metanizacja

### Elektroliza a metanizacja katalityczna

Nie ulega wątpliwości, że elektroliza to najważniejsza determinanta wpływająca na całościowy CAPEX. Koszt inwestycji w nią waha się obecnie średnio w przedziale 800-3000€/kW. Literatura dotycząca nakładów w metanizację jest dość mocno ograniczona, można jednakże dotrzeć do źródeł, które szacują jej koszt na poziomie 400 €/kW przy 5 MW-owym systemie na SNG oraz 130 €/kW przy 110 MW przy ciśnieniu roboczym wynoszącym w obu przypadkach 20 bar (Outotec GmbH; dane z 2014r.). Inni badacze, analizując z kolei łańcuch przetwarzania biomasy na gaz (Biomass to Gas) określili nakład w procesie metanizacji 14,8 MW CO przy ciśnieniu 15 bar. Wyniósł on odpowiednio 175 €/kW SNG (Gassner and Marechal; dane z 2009 r.) [4].

Tabela 2 Szacunkowy koszt w procesie metanizacji [4]

Table 2. Estimated cost in the methanation process [4]

Badacz	Szacowany koszt metanizacji, [€/kW SNG]
Lehner et al.	300-500
Ausfelder et al.	600 (w 2050 r.)
E&E Consultant	1500 (2014r.) / 500 (w 2030 r.)
Ueckerdt et al.	1000

W tabeli 2 przedstawiono szacunkowe koszty ponoszone w procesie metanizacji zaproponowane przez badaczy podejmujących w ostatnim czasie próby stworzenia takich szacunków. Można zauważyć, iż istnieje stosunkowo duża dysproporcja między zaprezentowanymi kalkulacjami. Najbardziej realistyczne wydają się jednak dane zaproponowane przez Outotec GmbH. Oparte są one bowiem na specjalnych wyliczeniach uwzględniających wielkość zakładu produkcyjnego. W rezultacie, można pokusić się o wniosek, iż pozostałe szacunki kosztów metanizacji są w mniejszym bądź większym stopniu zawyżone [4].

### Magazynowanie wodoru

W związku z faktem, iż proces elektrolizy może być prowadzony dużo dynamiczniej niż ma to miejsce w przypadku działania reaktora do metanizacji, zachodzi konieczność magazynowania wodoru. Rezultatem mniejszej dynamiki metanizacji jest wymóg magazynowania H<sub>2</sub> na większą skalę. Z drugiej strony, magazynowanie wodoru w mniejszym zakresie wiąże się z zastosowaniem większej instalacji do metanizacji [4].

Aicher i wsp. dokonali badań z zakresu wpływu dynamiki metanizacji na inwestycje w magazynowanie wodoru. Jako źródło energii, do analiz wykorzystali farmę wiatrową (lok. Niemcy). Przy warunkach:

- Zainstalowana moc elektrolizy: 36 MW (el.),
  - Ciśnienie przy składowaniu H<sub>2</sub>: 30-200 bar,
  - Ciśnienie metanizacji: 20 bar,
  - porównali przebieg metanizacji w dwóch przypadkach:
  - Case 1: Metanizacja działa w trybie stanu ustalonego i wytwarza 311 m<sup>3</sup> / h CH<sub>4</sub>, przy wymaganej pojemności magazynowania wodoru równej 1700 m<sup>3</sup>.
  - Case 2: Metanizacja może odbywać się w zakresie obciążenia 40-100% przy całkowitej wydajności metanizacji 591 m<sup>3</sup> / h CH<sub>4</sub>; roczna produkcja metanu podobna do przypadku 1. Magazyn wodoru ma pojemność 850 m<sup>3</sup> [4].
- Wyniki przeprowadzonych badań zamieszczono w tabeli 3.

Tabela 3 Porównanie przebiegu metanizacji

Table 3. Comparison of methanation processes

Investment in M€	Electrolysis	Compressor	H <sub>2</sub> storage	Methanation	Total
Case 1	28.8	1	8.3	0.7	38.8
Case 2	28.8	1	4.8	1.2	35.8

Badacze wywnioskowali, iż całkowita inwestycja w łańcuch Power to Gas może zostać zmniejszona o około 8% za sprawą dynamicznego prowadzenia metanizacji w porównaniu z operacją w stanie ustalonym (pomimo wzrostu inwestycji w metanizację). Widać wyraźnie zatem, że magazynowanie wodoru to drugi najbardziej znaczący czynnik przyczyniający się do inwestycji w system P2G.

### Koszty operacyjne

Analiza wydatków operacyjnych powszechnie określaną także jako OPEX (ang. operating expenditures) w kontekście wdrożenia systemu P2G wiąże się z takimi aspektami jak [4]:

- Cena energii elektrycznej
- Koszty CO<sub>2</sub>
- Potencjalne wykorzystanie ciepła i utleniania

## Koszt energii elektrycznej według pochodzenia

Cena wytwarzanej energii elektrycznej według zużytej energii pierwotnej jest zróżnicowana w zależności od rozwoju technologii i ich rozbudowy. Jeśli cena energii ze źródeł słonecznych lub wiatrowych była początkowo wyższa od średniej ceny energii ze źródeł nieodnawialnych, to spadała wraz z budową nowych obiektów.

Warto w tym kontekście wspomnieć o tzw. parytecie sieci (ang. grid parity), który jest niczym innym jak ceną energii elektrycznej wytwarzanej ze źródeł odnawialnych w porównaniu z ceną ze źródeł nieodnawialnych. W niektórych krajach (np. Niemcy, Włochy) parytet ten został już osiągnięty. W przypadku systemów fotowoltaicznych oznacza to niższy koszt kWh niż w przypadku sieci, stąd korzyść wynikająca z bezpośredniego wykorzystania tej energii elektrycznej bez wprowadzania jej do sieci [1].

Zwraca się także uwagę na tzw. umiarkowany koszt energii. To kryterium porównywania kosztów różnych energii bierze pod uwagę wszystkie zaangażowane podmioty oraz zmienne, takie jak kapitał początkowy, koszty operacyjne, paliwo czy utrzymanie. Koszty te są szacowane na cały okres eksploatacji obiektu. W ostatnich latach porównano koszty różnych źródeł wytwarzania energii elektrycznej. Ogólną tendencją jest spadek ceny odnawialnej energii elektrycznej [1].

## Koszty CO<sub>2</sub> oraz wykorzystanie ciepła i tlenu

W kontekście kosztów dwutlenku węgla, zazwyczaj postrzega się, że jest on ogólnie dostępny. Zauważono jednak, że przeciętny koszt równy 100 €/t CO<sub>2</sub>, może podnieść cenę syntetycznego metanu o około 2 ct/kWh SNG [4].

Jak wspomniano wcześniej, tlen oraz ciepło można zastosować potencjalnie jeszcze w innych procesach, jak chociażby w biogazowni. Wówczas przy wykorzystaniu pochodzącego z elektrolizy O<sub>2</sub> do pierwotnego odsiarczania biogazu, oczekiwany koszt to 32 000 €/a dla biogazowni o wydajności 1000 m<sup>3</sup> / h. Inni badacze także analizowali tkwiący w tym procesie potencjał. Uzyskali oni następujące wyniki [4]:

- wykorzystanie O<sub>2</sub> może obniżyć koszty SNG o około 2 ct / kWh (5000 h/a ; przy założeniu możliwości sprzedaży całego wyprodukowanego tlenu); Vandewalle i wsp.
- zmniejszenie kosztów SNG o 1,3 ct / kWh w przypadku wykorzystania O<sub>2</sub>; F.Graf i wsp.

## Metanizacja biologiczna a katalityczna

W kontekście kosztów operacyjnych, wartościowym okazuje się także porównanie nakładów finansowych na procesy metanizacji katalitycznej i biologicznej. Z przeprowadzonych dotąd badań wynika, iż [4]:

- przy instalacjach o stosunkowo niewielkich rozmiarach (rzędu 5 MW), koszty produkcji dla metanizacji katalitycznej niższe niż dla biologicznej,
- przy większych instalacjach (rzędu 110 MW), koszty produkcji dla metanizacji katalitycznej są 2,5-krotnie niższe niż w przypadku metanizacji biologicznej.

## Wnioski

Z przeprowadzonej analizy makroekonomicznej wynika, iż syntetyczny metan pochodzący z systemu P2G nie jest konkurencyjny ani w odniesieniu do biometanu (ok. 7 ct/kWh) ani do gazu ziemnego. Niezbędne pod względem ekonomicznym okazuje się zatem zintegrowanie takich kwestii jak usługi bilansujące, mobilność czy chociażby certyfikaty CO<sub>2</sub>. Z drugiej strony, należy zwrócić uwagę na możliwość P2G do wzrostu udziału energii ze źródeł odnawialnych w gazownictwie i transporcie a także ograniczenia do minimum rozbudowy infrastruktury sieci elektroenergetycznej, w związku z czym w koncepcji Power to Gas tkwi duży potencjał w kontekście przeprowadzania zrównoważonej i ekonomicznie uzasadnionej transformacji systemu energetycznego [4].

## 5. P2G w perspektywie aktualnego stanu polskiej gospodarki – analiza potencjału rozwoju

### 5.1 Polska strategia wodorowa

W lipcu 2020 r. wskutek sygnowania listu intencyjnego, zapoczątkowane zostały faktyczne działania na rzecz polskiej strategii wodorowej. Koordynatorem prac ukierunkowanych na realizację celów Listu jest Pełnomocnik Rządu ds. OZE. Projekt „Polskiej Strategii Wodorowej do roku 2030 z perspektywą do 2040 r.” pojawił się w I kwartale 2021 r. Należy pamiętać jednak, że jest to element także innych działań, które podejmują polscy decydenci z obszaru technologii energetycznych, takich jak [25]:

- Polityka energetyczna Polski do 2040 r.,
- Krajowy plan na rzecz energii i klimatu na lata 2021-2030,
- Strategia na rzecz Odpowiedzialnego Rozwoju do 2020 r. (z perspektywą do 2030 r.),
- Krajowe Ramy Polityki Rozwoju Infrastruktury Paliw Alternatywnych.

Projekt zakłada wdrażanie technologii wodorowych w przemyśle, energetyce oraz transporcie. Łańcuch wartości będzie obejmował produkcję, przesyłanie, magazynowanie oraz wykorzystanie H<sub>2</sub>. Strategia zobrazuje charakterystykę bieżącego stanu na rynku wodorowym, określi zasadnicze problemy natury ekonomicznej i technologicznej a także zaproponuje perspektywiczne kierunki rozwoju rynku celem stania się konkurencyjnym w niedalekiej perspektywie czasowej. Planuje się zapewnienie takich warunków, które umożliwią między innymi dostęp do eksploatacji 500 autobusów napędzanych wodorem i wyprodukowanych w Polsce (do 2025 r.) oraz 2000 autobusów wodorowych (do 2030 r.). Mowa jest także o budowie 32 stacji tankowania wodoru. W kontekście technologii Power-to-Gas, rząd polski zamierza rozwijać wykorzystanie zainstalowanej mocy w odnawialne źródła energii dla potrzeb produkowania H<sub>2</sub> oraz syntetycznych paliw bazując na procesie elektrolizy. Szacuje się, że moc zainstalowana elektrolizerów sięgnie 2 GW w roku 2030 [25].

### 5.2 Studium przypadku – analiza SWOT i koncepcje modelu biznesowego

Dynamicznie zmieniający się krajobraz energetyczny świata wymusza stałe dostosowywanie się do zawieranych porozumień na płaszczyźnie międzynarodowej. Państwo Polskie także jest zobowiązane podporządkowywać się przepisom i jako członek Unii Europejskiej tak kreować oraz realizować założenia polityki energetycznej aby wywiązywać się z przyjmowanych norm i standardów, jak chociażby wskutek sygnowania Porozumienia Paryskiego.

„Zielone technologie wodorowe” jawią się jako swego rodzaju remedium na wiele bolączek nie tylko szeroko rozumianej energetyki, lecz także innych obszarów gospodarki jak transport czy przemysł. Mając na uwadze uwarunkowania technologiczno-środowiskowe oraz prawno-ekonomiczne, dokonano analizy SWOT wdrażania projektów wykorzystujących koncepcję P2G w krajowym systemie energetycznym. Analiza identyfikująca oraz eksponująca silne i słabe strony (Strengths & Weaknesses), a także istniejące i potencjalne szanse oraz zagrożenia (Opportunities & Threats) jest narzędziem wspomaganie decyzji, pozwalającym na uporządkowanie i analizę informacji. Ma charakter wielowymiarowy a istota metody zakłada podejście od endogenicznych czynników i barier do egzogenicznych szans i zagrożeń.

Przeprowadzenie analizy SWOT oraz zidentyfikowanie poszczególnych elementów składowych modelu biznesowego pozwala na stworzenie realnych propozycji rozwiązań projektowych tworzących łańcuch procesowy, umożliwiającym tym samym integrację sektora energetycznego.

Na rysunku 5 zamieszczono schematy ideowe potencjalnych zastosowań P2G. Konkretnie wykorzystanie technologiczne przypisane jest określonym uczestnikom na rynku energii, biorącemu udział w budowie bądź eksploatacji systemu P2G. Nie uwzględnia się tutaj natomiast oceny opłacalności ekonomicznej danego rozwiązania, prawnej możliwości jego wprowadzenia czy nawet wdrożenia pod względem technologicznym. Analiza taka pokazuje jak wielki jest potencjał w rozwiązaniach koncepcyjnych P2G, ze względu na oferowaną elastyczność systemową.

### STRENGTHS

1. Polski rynek energetyczny charakteryzuje aktualnie wyraźna tendencja wzrostowa wolumenu mocy zainstalowanej w źródłach odnawialnych, która jest rezultatem redukcji eksploataowania paliw kopalnych oraz zobowiązaniem się do zmniejszenia emisji CO<sub>2</sub>.
2. Polskie koncerny paliwowo-energetyczne są wyraźnie zainteresowane rozwojem rynku paliw alternatywnych oraz technologii odnawialnych, co napędza ich rozwój.
3. Stosunkowo dobrze rozwinięta infrastruktura magazynowania gazu (7 podziemnych magazynów o aktualnej pojemności czynnej ok. 3,17 mld m<sup>3</sup> oraz inne technologie tj. baterie, CAES, elektrycznie szczytowo-pompowe) pozwoli na efektywniejsze gospodarowanie źródłami konwencjonalnymi w przypadku dużego poziomu partycypacji energii z OZE w ogólnym miksie energetycznym.
4. Wysoki potencjał krajowy pod względem produkcji wodoru (III miejsce w UE oraz V na świecie - szacunki Ministerstwa Energii na rok 2019).
5. Ekspansja gospodarki wodorowej, przy założeniu wykorzystania istniejącej infrastruktury gazu do wydajnej dystrybucji i magazynowania wodoru, zapewni potencjalnie niskokosztową transformację, ponieważ sieci energetyczne są zintegrowane z inteligentną siecią energetyczną [19].
6. Magazynowanie energii poprzez P2G może opóźnić lub zrekomensować potrzebę budowy dodatkowych zdolności wytwórczych lub przesyłowych.
7. Motorem napędowym do rozwoju odnawialnych technologii energetycznych w Polsce jest konieczność wywiązania się z zawartych porozumień międzynarodowych (prawnie wiążących) w dziedzinie klimatu czyli przede wszystkim Porozumienia Paryskiego – projekty P2G dobrze wpisują się w strategię zwiększania udziału w krajowych mikсах energetycznych energii generowanej z OZE.
8. Produkcowanie „zielonego wodoru” w procesie elektrolizy z wykorzystaniem energii pochodzącej z źródeł odnawialnych może być prowadzone także w dużej skali, w tak zwanych układach przepływowych, co w rezultacie zwiększy efektywność i konkurencyjność tego rozwiązania w porównaniu do ładowania baterii [7].
9. Infrastruktura gazowa będzie mogła liczyć na wsparcie finansowe ze strony Unii Europejskiej.

### WEAKNESSES

1. W kontekście transportu napędzanego paliwami gazowymi, należy pamiętać, iż rozwój rynków paliw w krajach UE jest silnie uzależniony od polityk fiskalnych poszczególnych państw. Wdrażanie zielonych projektów wodorowych, tudzież ogólnie bazujących na paliwach gazowych, wymaga długoterminowej stabilności przepisów podatkowych, a tutaj nie można powiedzieć, że takowe oferuje polski rząd. Na paliwa gazowe nałożona jest akcyza, wobec czego pojawia się ryzyko podwyższenia stawki tej opłaty w przyszłości.
2. Technologia magazynowania energii stosowane dotychczas w Polsce charakteryzują stosunkowo niskie pojemności jednostek magazynowych a także pozostaje kwestia stacjonarności oraz wciąż niewystarczająco konkurencyjnych kosztów.
3. Brak strategicznego dokumentu wskazującego kierunek rozwoju technologii wodorowych oraz stosownych regulacji prawnych dotyczących gospodarki wodorowej.
4. Brak uzasadnienia ekonomicznego realizacji inwestycji projektów wodorowych bez znacznego wsparcia ze środków publicznych.
5. Technologie wodorowe, które de facto są na wczesnym etapie rozwoju są drogie, a wodor nasyca trudności przy jego wykorzystaniu i magazynowaniu.
6. Ładowanie baterii ma wyższy stopień efektywności niż produkowanie H<sub>2</sub> w procesie elektrolizy z udziałem źródeł odnawialnych [7].
7. Jest wysoce prawdopodobne, że wsparcie finansowe oferowane przez UE będzie adresowane jedynie w aspekcie przystosowywania istniejącej infrastruktury gazowej do transportu odnawialnego medium tj. wodoru [2].

### OPPORTUNITIES

1. IV pakiet gazowy (ang. Gas Package 2020) – w dużym stopniu obejmujący regulacje tak zwanego sector coupling oraz poświęćny gazom ze źródeł odnawialnych – wzmocnienie integracji sektora gazowego i elektroenergetycznego [12].
2. Mieszanie wyprodukowanego w elektrolizerach wodoru z gazem obecnym w sieciach gazowych stanowi atrakcyjne rozwiązanie pod względem problemu stacjonarności i pojemności, gdyż takie medium będzie wciąg transportowane w obiegu gazowniczym. Magazynowanie energii w wodrze niweluje zatem ograniczenia dotyczące miejsc odyskwiwania energii a za sprawą sieci gazowej oferuje znacznie większą pojemność.
3. Magazynowanie energii w wodrze stwarza możliwość odyskwiwania energii wykorzystując infrastrukturę, która już istnieje z uwagi na fakt, iż gaz można zastosować do zasilania układów z turbiną gazową.
4. Wzrost wolumenu wykorzystania wodoru oraz substytuowanie nim paliw nieodnawialnych znacząco przyczynia się do ogólnej dekarbonizacji i rozwoju gospodarki bezemisyjnej.
5. Oprócz znaczących korzyści ekonomicznych wynikających ze sprzedaży wodoru do celów energetycznych lub jako przemysłowej substancji chemicznej, Power-to-Gas oferuje również elastyczne magazynowanie energii.
6. Magazynowanie energii za pośrednictwem Power-to-Gas najzwyczajniej nadmierną mocą obciążenia podstawowego [19].
7. Ze względu na duże zapotrzebowanie na wodor przemysłowy, zastąpienie wodoru wodorem elektrycznym w miejsce powszechnie stosowanego reformingu metanu z parą wodną do zastosowań przemysłowych, takich jak rafinacja ropy naftowej, stanowi najlepszą okazję do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych, biorąc pod uwagę obecne ścieżki wykorzystania wodoru [10].
8. Elastyczność technologii wytwarzania wodoru oznacza, że P2G może być wykorzystywana do świadczenia usług regulacji częstotliwości w sieci - zarządzanie mocą elektrolizera w celu świadczenia usług regulacji napięcia [19].
9. W ramach polityki kredytowej Europejskiego Banku Inwestycyjnego wspierane będą inicjatywy związane z gazem klasyfikowanym jako niskoemisyjny a zatem na wsparciu finansowym z EBI skorystają projekty, których zakres będzie skierowany na przystosowywanie istniejącej infrastruktury do transportu gazu niskoemisyjnego albo jego mieszanie z gazem ziemnym [2].

### THREATS

1. Zasadniczym zagrożeniem w kontekście projektów P2G jest brak możliwości sterowania energią odnawialną wiatru i słońca. Przez niesterowność rozumie się niezapewnienie zgodności z popytem na energię elektryczną co następuje trudności w przypadku sprzężenia elektrycznego i gazowego parku maszynowego.
2. Nieuniknionym faktorem okazuje się niepewność, bowiem pomimo zdolności do dokonywania dokładnych prognoz produkcji energii z OZE może pojawić się ryzyko generowania nie takiego wolumenu energii jaką wyznaczają prognozy [3].
3. Negatywnym przy magazynowaniu z wykorzystaniem aktualnie najpopularniejszej technologii jaką są baterie litowo-jonowe jest proces ich samorozładowania. Problematyczna okazuje się także ograniczona ilość cykli ładowania, stosowanie do ich konstruowania metali ziem rzadkich (np. kobalt). Co więcej, jedynie niewielki odsetek produkowanych baterii poddawany jest recyklingowi podważając założenia zrównoważonej gospodarki.
4. Chociaż projekty P2G oferują potencjalnie szereg zastrzeżeń, z którymi wiąże się zyskowe strumienie, to jeśli jako punkt odniesienia stosuje się ceny wodoru przemysłowego lub etanolu, okazuje się konieczne przyjęcie dalszych zachęt rządowych lub zbalansowanie alternatywnych źródeł finansowania, aby uczynić je rentownymi [19].
5. Sankcjonowanie pierwszeństwa wprowadzania energii z OZE do sieci elektroenergetycznej niesie za sobą ryzyko utraty kontroli nad sterowalnością źródeł konwencjonalnych skutkując wysokimi potrzebami w zakresie magazynowania energii [3] – nieefektywność gospodarowania źródłami konwencjonalnymi.

## Identyfikacja elementów modelu biznesowego w projektach P2G

### I. Segmenty klientów

Segmenty klientów to aspekt modelu biznesowego, który określa organizacje i grupy ludzi, docelowo do których dane przedsiębiorstwo/projekt usiłuje dotrzeć i zamierza dostarczyć wartość. Klientami w przypadku komercyjnego wdrażania projektów P2G będą odbiorcy końcowi, do których jest dostarczana energia na podstawie umowy dostawy. Projekty zakładać mogą oferowanie produktu na rynku masowym, gdzie nie ma rozróżnienia ze względu na konkretne grupy klientów bądź stworzenie zdywersyfikowanej oferty obsługującej dwa zgoła odmienne segmenty odbiorców (np. podział na tzw. duży biznes oraz gospodarstwa domowe), charakteryzujących się różnymi potrzebami, co w przypadku polskich koncernów paliwowo-energetycznych jest częstą praktyką.

### II. Propozycja wartości

Propozycja wartości jest niczym innym jak zbiorem produktów oraz świadczonych usług tworzących potencjalną wartość dla wyodrębnionych segmentów klientów czy odbiorców, które rozwiążą ich problemy bądź zaspokoją potrzeby.

Nie ulega wątpliwości, iż propozycja wartości jaką niosą za sobą projekty P2G są innowacją oferującą przełomowy koszyk dóbr. W uproszczeniu, istota systemów P2G opiera się na wykorzystaniu wygenerowanej z źródeł odnawialnych energii elektrycznej do produkcji gazu (wodór produkowany w elektrolizerach), który zostaje zatłoczony do rurociągów gazowych. W rezultacie otrzymuje się ekologiczne paliwo gazowe niosące energią pierwotną mogące być wykorzystane w energetyce, przemyśle czy transporcie.

Z propozycją wartości jaką niosą projekty P2G związane są aspekty o charakterze jakościowym takie jak nowość (innowacyjny sposób wytwarzania ekologicznych mediów energetycznych w zestawieniu chociażby z wysokoemisyjną energetyką konwencjonalną), dostępność (np. dynamicznie rozwijająca się infrastruktura gazowa w Polsce stwarza możliwość realizowania coraz większej ilości procesów przyłączeniowych odbiorców do sieci gazowej), wygoda i użyteczność, jak również aspekty o charakterze ilościowym takie jak wydajność (magazynowanie energii w wodorze zamiast np. w ograniczonych pojemnościowo bateriach litowo-jonowych), cena/koszt (dynamiczny rozwój rynku PV owocuje już od pewnego czasu konkurencyjnymi nakładami inwestycyjnymi i eksploatacyjnymi dla przeciętnego odbiorcy w kontekście użytkowania energii elektrycznej, który może korzystać z rządowych programów wsparcia finansowego) w porównaniu chociażby z energetyką węglową (niechęć banków i instytucji do finansowego wspierania projektów nieodnawialnych) czy niższe ryzyko (np. eliminacja problemu niesterowalności w przypadku energii generowanej z wiatru i słońca).

### III. Kanaly

Sposoby jakimi organizacje komunikują się z segmentami klientów a także w jakie dostarczają propozycje wartości to kanały modelu biznesowego.

W przypadku projektów P2G zasadniczą rolę odgrywają podmioty prowadzące działalność z zakresu wytwarzania, przesyłu, dystrybucji, obrotu oraz magazynowania wytwarzanych mediów. Warto zaznaczyć, iż kanały pełnią szereg funkcji, w tym podnoszenie świadomości odbiorców o produktach i usługach, realizowanie propozycji wartości czy zapewnianie tzw. wsparcia posprzedażowego.

Obecnie obserwuje się coraz większą troskę społeczeństwa w kwestii ochrony środowiska oraz zapobiegania zmianom klimatu i tak np. odbiorcy energii elektrycznej zwłaszcza w dużych aglomeracjach, świadomi negatywnych skutków, jakie wiążą się z jej produkcją z wysokoemisyjnych źródeł kopalnych, preferują wybór dostawcy oferują-

cego sprzedaż energii z gwarancją pochodzenia czyli taką, która choć w pewnym stopniu bazuje na źródłach odnawialnych licząc się z nieco wyższymi przeciętnymi rachunkami za zużycie bądź też sami inwestują w ekologiczne rozwiązania takie jak pompy ciepła czy panele fotowoltaiczne. To właśnie w takich sytuacjach niezwykle cenne okazuje się dla organizacji projektowych właściwe zdefiniowanie kanałów w modelu biznesowym.

Przepływ energii w gospodarce opartej o koncepcję P2G zakłada takie scenariusze jak np. zasilanie wózków widłowych z wodorowymi ogniwami paliwowymi (klienci – odbiorcy przemysłowi) czy domieszkowanie wyprodukowanego H<sub>2</sub> do sieci gazu ziemnego, tworząc gaz ziemny wzbogacony wodorem dla odbiorców indywidualnych chociażby na potrzeby ogrzewnictwa mieszkaniowego.

### IV. Relacje z klientami

Przedsiębiorstwa z sektora paliwowo-energetycznego powinny w sposób precyzyjny określać relacje z danymi segmentami klientów – odbiorców produktów i usług generowanych wskutek wdrażania projektów P2G. Pracując w środowisku projektowym należy wziąć pod uwagę wszystkich interesariuszy oraz zarządzać relacjami z nimi bowiem z realizowaniem projektów związane jest występowanie złożoności społecznej. Teoria Freemana wyróżnia dwa podejścia do zarządzania relacjami z interesariuszami w projektach: zarządzanie interesariuszami (ang. Managing OF Stakeholders) oraz zarządzanie dla interesariuszy (ang. Managing FOR Stakeholders). Sugeruje się, aby project managerowie sprawujący nadzór nad prowadzeniem projektów energetycznych wykorzystywali założenia drugiego z wymienionych podejść, które jest jedynym słusznym w kontekście organizacji deklarujących prowadzenie polityki zrównoważonego rozwoju.

### V. Strumienie przychodów

Strumienie przychodów definiują środki uzyskane przez organizacje wskutek świadczonych usług. Poziom zysków ustalany jest jako różnica między generowanymi przychodami a ponoszonymi kosztami. W przypadku projektów P2G mówi się o szerokim spektrum zastosowania, w tym między innymi wykorzystanie wodoru w transporcie (ogniwa paliwowe, samochody elektryczne), w energetyce i ciepłownictwie czy przemyśle (np. nawozy w przemyśle chemicznym, paliwa w przemyśle petrochemicznym) a wciąż badane są potencjalnie nowe sposoby tworzenia łańcucha dostaw. W każdej z tych branż pojawi się opcja sprzedaży medium, za które odbiorcy końcowi będą uiszczać opłaty (opłata abonencka, opłata za korzystanie, prowizje z tytułu pośrednictwa, sprzedaż aktywów etc.). Dla podmiotów świadczących usługi i oferujących w ramach wdrażanych projektów koszyk dóbr, istotne będzie osiągnięcie korzyści skali, które pojawiają się wraz ze wzrostem wolumenu produkcji oraz korzyści zakresu związane z faktem poszerzenia zakresu działalności.

### VI. Kluczowe zasoby

Kluczowe zasoby w modelu biznesowym charakteryzują najistotniejsze zasoby, które okazują się niezbędne, aby model mógł poprawnie funkcjonować. Kreują one sposobność, aby projekt/przedsiębiorstwo mogło zaproponować wartość, dotrzeć na rynek, podtrzymać relacje z klientem i finalnie wygenerować przychód. Wyróżniamy zasoby ludzkie, fizyczne, finansowe oraz intelektualne.

W kontekście projektów P2G wśród zasobów fizycznych należy wymienić takie aktywa jak odpowiednio przystosowana elektroenergetyczna i gazowa sieć dystrybucyjna (istotne zwłaszcza w przypadku chęci zatłaczania zwiększonej procentowej ilości wodoru do sieci gazowych), niezbędne urządzenia, systemy i infrastruktura produkcyjna, budynki i pojazdy. Nie ma możliwości wdrażania innowacyjnych projektów opartych o „zielony” wodór bez stosownych regulacji prawnych oraz zasobów finansowych tudzież gwarancji finansowania. Pojawia się zatem potrzeba wsparcia zwłaszcza po stronie programów rządowych i wspólnotowych (UE) gwarantujących linie kredytowe, korzystnie





rys. 5. Studium przypadku - propozycje rozwiązań koncepcyjnych w ramach projektów Power-to-Gas w Polsce [oprac. własne oraz inspirowane [8, 6, 15, 17, 14] Fig. 5. Case study - proposals for conceptual solutions for Power-to-Gas projects in Poland [own and inspired study [8, 6, 15, 17, 14]]

oprocentowane pożyczki czy opcje na akcje. Niezbędne są zatem konkretne założenia w strategiach energetycznych (w tym wodorowych) i wynikające z nich formy wsparcia finansowego.

Nie ulega wątpliwości, iż wskutek pojawienia się zasobów fizycznych, automatycznie pojawia się potrzeba odpowiedniego zarządzania. W związku z tym niezbędni będą wykwalifikowani pracownicy (zasoby ludzkie) oraz związana z nimi wiedza, patenty i prawa autorskie czy zawierane sojusze partnerskie (zasoby intelektualne).

## VII. Kluczowe działania

Kluczowe działania to zespół inicjatyw, które musi podjąć organizacja (projektowa, rządowa etc.) aby jej model funkcjonował w sposób sprawny. Analogicznie jak w przypadku kluczowych zasobów są nieodzownym elementem na drodze do zapewnienia wartości dla odbiorcy, utrzymania z nim relacji i finalnego wygenerowania przychodu. Osobliwość konkretnego modelu biznesowego narzuca charakter działań kluczowych.

W przypadku przedsiębiorstw paliwowo-energetycznych wdrażających projekty P2G, kluczowe działania dotyczą produkcji odnawialnego medium energetycznego, a zatem wiążą się z projektowaniem infrastruktury i urządzeń systemowych, wytwarzaniem oraz dostarczeniem „zielonego” paliwa gazowego z jednoczesnym zapewnieniem wysokiej jakości i bezpieczeństwa dostaw. Nie ulega jednak wątpliwości, że kamieniem węgielnym jest stworzenie odpowiednich regulacji prawnych w ramach polskiej polityki energetycznej i strategii wodorowej, których założenia będą zgodne z polityką prowadzoną przez Komisję Europejską.

## VIII. Kluczowi partnerzy

Na kluczowych partnerów w modelu biznesowym składają się współpracownicy oraz dostawcy. W przypadku projektów bazujących na koncepcji P2G wymagane jest sprzężenie systemu elektroenergetycznego, odnawialnych źródeł generujących energię elektryczną (głównie farmy wiatrowe i fotowoltaiczne) z systemem gazowniczym. Wymagana jest w związku z tym ścisła współpraca podmiotów prowadzących wyżej wspomniane rodzaje działalności w Polsce w kontekście wytwarzania, przesyłu, dystrybucji, obrotu oraz magazynowania wytwarzanych mediów.

Nie ulega wątpliwości, iż wdrażając projekty P2G należy wziąć pod uwagę wszystkich uczestników rynku energii, a zatem prócz klientów także operatorów sieci, producentów, dostawców, koordynatorów grup bilansujących, maklerów, brokerów czy zarządzających portfelem.

Tak jak w przypadku np. usługi przesyłu gazu, mamy w Polsce do czynienia z jednym właścicielem sieci przesyłowej, który pełni funkcję operatora, tak już w przypadku dystrybucji czy obrotu, gdzie podmiotów prowadzących te działalności może być więcej, warto rozważyć zawieranie sojuszy strategicznych. Redukowanie poziomu ryzyka i niepewności czy korzyści skali są powodami, dla których przedsiębiorstwa decydują się na takie sojusze celem optymalizacji własnych modeli biznesowych, redukcji kosztów czy też uzyskania dostępu do zasobów.

## IX. Struktura kosztów

Wszelkie wydatki, które ponosi organizacja wskutek implementacji konkretnego modelu biznesowego składają się na tak zwaną strukturę kosztów. Działania takie jak kreowanie wartości dla klienta, podtrzymanie z nim relacji czy nawet finalne wygenerowanie przychodu, wiążą się z nieuniknionym ponoszeniem kosztów. Wskazanie kluczowych partnerów, zasobów i działań pozwala na stosunkowo łatwe oszacowanie takich kosztów.

W strukturze kosztów w przypadku wdrażania projektów opartych na koncepcji P2G zasadniczą rolę odgrywają koszty stałe i koszty zmienne. Pierwsze z wymienionych to takie, które utrzymują się na niezmiennym poziomie wobec świadczonego usługi oraz wolumenu generowanych dóbr. Jako przykłady można podać tutaj koszty związane z utrzymaniem oraz eksploatacją jednostek wytwórczych tj.

farmy wiatrowe i fotowoltaiczne, gazowych i elektroenergetycznych sieci przesyłowych i dystrybucyjnych czy też czysze i płace pracowników. Koszty zmienne podlegają zaś wahaniom proporcjonalnym do świadczonych usług i wolumenu generowanych dóbr. W przypadku branży energetycznej występują prawnie wiążące regulacje narzucone przez Komisję Europejską, których niespełnienie wiąże się z ponoszeniem kar finansowych. Przykładem kosztów zmiennych mogą być ceny uprawnień do emisji dwutlenku węgla. W Unii Europejskiej w listopadzie 2021r., ich poziom przekroczył 70 € za tonę, osiągając tym samym dotychczasowy rekord. Nie ulega wątpliwości, iż będzie on rósł, tym bardziej, że Europejski Bank Inwestycyjny już teraz zastrzega niefinansowanie źródeł, które emitują więcej niż 250 kg CO<sub>2</sub> na 1 MWh.

## Wnioski ze studium przypadku

Zrozumienie i posługiwanie się jednolitą definicją modelu biznesowego stanowi fundamentalny element jeśli przedsiębiorstwa, w tym energetyczne, chcą stworzyć innowacyjne modele biznesowe. Osterwalder&Pigneur założyli, iż „Model biznesowy opisuje przesłanki stojące za sposobem, w jaki organizacja tworzy wartość oraz zapewnia i czerpie zyski z tej wytworzonej wartości”. Dewiza ta przyświecać powinna osobom odpowiedzialnym za kreowanie założeń projektowych oraz wdrażanie projektów opartych na koncepcji Power-to-Gas w krajowym systemie energetycznym.

Istotnym okazuje się zidentyfikowanie, prócz wad i czyhających wyzwań omówionych w poprzedniej części pracy, przede wszystkim zalet, których doszukać się można w tych rozwiązaniach. Wdrażanie i zarządzanie projektami nierozzerwalnie wiąże się z potrzebą ciągłego uzasadnienia biznesowego. Pod względem technicznym P2G jest w stanie zaoferować takie uzasadnienie za sprawą [17, 14]:

- Może być wdrażany stopniowo, aby dopasować się do zmieniających się potrzeb infrastruktury;
- Zapewnia najwyższą gęstość magazynowania energii spośród obecnie dostępnych technologii magazynowania energii;
- Wykorzystuje sprawdzoną, skomercjalizowaną technologię elektrolizera;
- Jest w stanie zwiększyć odnawialną zawartość końcowych paliw ropopochodnych bez konieczności zmiany technologii pojazdów lub infrastruktury do tankowania;
- Ma udowodnioną zdolność do świadczenia „pomocniczych usług” w systemie elektroenergetycznym;
- Może magazynować i dystrybuować energię w istniejącej infrastrukturze gazu ziemnego, w tym pod ziemią (np. kawerny solne) na dużą skalę i po niższych kosztach, a także jako sprzężony gaz lub skroplony wodór w zbiornikach magazynowych.

Tworzenie rozwiązań koncepcyjnych wymaga spojrzenia z szerszej perspektywy, bowiem nie tylko należy uwzględnić fakt możliwości technicznej implementacji ale także trzeba odnieść się do obowiązujących regulacji prawnych oraz liczyć się z ograniczonym budżetem.

## 6. Podsumowanie

W niniejszym artykule podjęto problematykę konwersji odnawialnej energii elektrycznej na chemiczne nośniki energii, w tym przede wszystkim wodór. Przeprowadzono analizę techniczno-ekonomiczną możliwości wdrażania projektów opartych na technologii Power-to-Gas w krajowym systemie energetycznym, aby ocenić rozwój tych technologii oraz słuszność potencjalnego wprowadzenia na szeroką skalę „zielonych technologii wodorowych” w Polsce.

Nie ulega wątpliwości, iż rosnące ceny paliw konwencjonalnych i zaawansowany stopień szczyptywania (ang. *recovery factor*) surowców energetycznych zmuszają do poszukiwania alternatyw. Za sprawą transformacji oraz decentralizacji, które zachodzą w systemie energetycznym, kreowane są innowacyjne modele biznesowe uwzględniające pojawianie się wciąż nowych uczestników. Warto zatem zaznaczyć, iż stopień zagregowania zdecentralizowanych jednostek zarówno maga-

## LITERATURA

zynujących, wytwórczych, jak i obciążeniowych będzie rósł i silniej oddziaływał na system energetyczny oparty na energii z OZE chociażby w ramach tak zwanych wirtualnych elektrowni [12].

W kontekście gospodarki opartej na tak zwanym „zielonym wodrze”, należy identyfikować ją nie tylko przez pryzmat technologii wytwarzania ale także uwzględniając kwestie dystrybucji, magazynowania oraz wykorzystania wodoru. W artykule proponuje się aby modele biznesowe projektów P2G oparte były o systemy wytwarzania, transportowania oraz magazynowania, które będą rozproszone a także scentralizowane. Zastosowanie znajda tutaj rzecz jasna sieci dystrybucyjne i przesyłowe.

Aby pokusić się o dokonanie oceny słuszności wdrażania projektów P2G w polskim systemie energetycznym należy zwrócić uwagę na zasadniczą kwestię, jaką jest celowość wykorzystywania „zielonego wodoru”. Po pierwsze, na dzień dzisiejszy niezbędnym okazuje się utrzymać źródła konwencjonalne a jednocześnie inwestować w nowe źródła szczytowe w Polsce. Uwadze nie może umknąć fakt, że klasycznych układów gazowych i gazowo-parowych nie można definiować już jako niskoemisyjnych źródeł.

W kontekście transformacji energetycznej, a zatem przede wszystkim zredukowania poziomu emisji gazów cieplarnianych, nieuniknionym wydaje się implementowanie w systemie jednostek odnawialnych źródeł energii na dużą skalę. Należy pamiętać jednakże o jedynie okresowej dostępności energii z OZE co wiąże się z ryzykiem niepokrywania się okresów zwiększonego generowania OZE z okresami zwiększonego zapotrzebowania na energię elektryczną.

Na celowość wykorzystania wodoru składa się także kwestia wielkoskalowego (cały system) magazynowania energii, które zapewnić mogłyby na przykład magazyny szczytowo-pompowe. Nie ulega wątpliwości, że jednak w przypadku Polski pełnią one minimalną rolę. Ponadto poziom skali systemów bateryjnych nadal okazuje się zbyt niski, nie pozwalając w rezultacie na odpowiednie sprzężenie „dużej energetyki” i przemysłu z OZE [12].

Wdrażanie projektów opartych na koncepcji P2G niewątpliwie oferuje szeroki zakres potencjalnych zastosowań za sprawą „zielonego wodoru” jako substratu w przemyśle, między innymi do produkowania paliw syntetycznych czy nośników energii ale także bezpośrednio w postaci produktu końcowego wykorzystywanego w energetyce zawodowej i rozproszonej przy wytwarzaniu energii elektrycznej a także w transporcie czy ciepłownictwie.

Projekty bazujące na koncepcji P2G w kontekście integracji sektorów oraz transformacji energetycznej Polski przyniosą następujące korzyści:

- „zielony wodór” jako medium nadające innowacyjną rolę sektorowi gazowniczemu na płaszczyźnie przesyłu, dystrybucji oraz magazynowania wodoru i gazu ziemnego
- „świety graal” w dekarbonizacji gospodarki – istotny krok na drodze do neutralności klimatycznej (brak śladu węglowego)
- technologie wodorowe wsparciem przy ekspansji źródeł OZE pod kątem magazynowania energii, zagospodarowania jej nadwyżek oraz w aspekcie skali wdrażania
- szeroki wachlarz zastosowań w transporcie – postać czysta bądź jako bezemisyjne paliwo syntetyczne (paliwo pochodne np. synteza amoniaku z „zielonym wodorem”)

Przeprowadzone analizy techniczno-ekonomiczne, w tym w szczególności analiza SWOT, zidentyfikowanie poszczególnych czynników składających się na model biznesowy, analiza kosztów oraz propozycje konkretnych rozwiązań ideowych przesądzą o słuszności postawionej tezy głoszącej, iż projekty bazujące na koncepcji P2G w warunkach gospodarczych Polski są technicznie i ekonomicznie uzasadnione. Za sprawą integracji sektorów odbywającą się w praktyce poprzez wdrażanie projektów P2G, możliwe jest zwiększenie niezawodności dostaw energii, zdywersyfikowanie jej źródeł oraz redukcja emisyjności, a w rezultacie przeprowadzenie procesu transformacji energetycznej w Polsce w sposób ekonomicznie i technologicznie uzasadniony, pomimo wyzwań, aktualnego, krajowego miksu energetycznego oraz ogólnej złożoności zagadnienia.

- [1] Boudellal M., *Power-to-Gas: Renewable Hydrogen Economy for the Energy Transition*. De Gruyter; (2018)
- [2] European Investment Bank, *EIB energy lending policy: Supporting the energy transformation*, (2019)
- [3] Futyma K., Wołowicz M., Olesiejuk P., *Analiza efektywności energetycznej technologii Power-to-Gas-to-Power*, Instytut Techniki Ciepłej, Politechnika Warszawska, (2019)
- [4] Götz M., Lefebvre J., Mörs F., Koch A. M., Graff, A., Bajohr S., Reimert r., Kolb T.: *Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review*. *Renew. Energ.* 85(2016)
- [5] Grueger, F.; Möhrke, F.; Robinius, M.; Stolten, D. *Early power to gas applications: Reducing wind farm forecast errors and providing secondary control reserve*. *Appl. Energy*. (2017)
- [6] Guandalini, G.; Robinius, M.; Grube, T.; Campanari, S.; Stolten, D. *Long-term power-to-gas potential from wind and solar power: A country analysis for Italy*. *Int. J. Hydrogen Energy* (2017)
- [7] Kupiecki J., *Sector coupling – jak zintegrować system energetyczny w Polsce – webinar*, Centrum Technologii Wodorowych, Instytut Energetyki, (2021)
- [8] Lehner M., Tichler r., Steinmüller H., Koppe M., *Power-to-gas: technology and business models*. Cham etc.: Springer; (2014)
- [9] Mazloomi, K.; Gomes, C., *Hydrogen as an energy carrier: Prospects and challenges*. *Renew. Sustain. Energy Rev.* (2012)
- [10] Mukherjee U, Fowler MW, Hajimiragha A. *Power-to-Gas energy storage*. In: IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE'14), 11-13 August, 2014, Oshawa, Canada
- [11] Mukherjee, U.; Elsholkami, M.; Walker, S.; Fowler, M.; Elkamel, A.; Hajimiragha, A. *Optimal sizing of an electrolytic hydrogen production system using an existing natural gas infrastructure*. *Int. J. Hydrogen Energy* (2015)
- [12] Olczak M., Piebalgs A., *What to expect from the 2020 Gas Package*, Politics and Governance, (2019)
- [13] Qadrdan, M.; Abeysekera, M.; Chaudry, M.; Wu, J.; Jenkins, N., *Role of power-to-gas in an integrated gas and electricity system in Great Britain*. *Int. J. Hydrogen Energy* 2015
- [14] Reuß, M.; Grube, T.; Robinius, M.; Preuster, P.; Wasserscheid, P.; Stolten, D. *Seasonal storage and alternative carriers: A flexible hydrogen supply chain model*. *Appl. Energy* (2017)
- [15] Schiebahn, S.; Grube, T.; Robinius, M.; Tietze, V.; Kumar, B.; Stolten, D. *Power to gas: Technological overview, systems analysis and economic assessment for a case study in Germany*. *Int. J. Hydrogen Energy* (2015)
- [16] Schmidt O., Gambhir A., Staffell I., Hawkes A., Nelson J., Few S., *Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study*, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 42, Issue 52, (2017)
- [17] Sharma, S.; Ghoshal, S.K. *Hydrogen the future transportation fuel: From production to applications*. *Renew. Sustain. Energy Rev.* (2015)
- [18] Specht, M.; Brellocks, J.; Frick, V.; Stürmer, B.; Zuberbühler, U.; Sterner, M.; Waldstein, G., *Storage of renewable energy in the natural gas grid*. *Erdöl Erdgas Kohle* (2010)
- [19] Walker S.B., van Lanen D., Fowler M., Mukherjee U., *Economic analysis with respect to Power-to-Gas energy storage with consideration of various market mechanisms*. University of Waterloo; (2015)
- [20] Walker, S.B.; Mukherjee, U.; Fowler, M.; Elkamel, A., *Benchmarking and selection of Power-to-Gas utilizing electrolytic hydrogen as an energy storage alternative*. *Int. J. Hydrogen Energy* (2016)

## ŹRÓDŁA INTERNETOWE:

- [21] <https://www.pse.pl/home>, dostęp: 30.07.2020
- [22] <https://rynek-energii-elektrycznej.cire.pl>, dostęp: 30.07.2020
- [23] <https://www.ure.gov.pl>, dostęp: 30.07.2020
- [24] <https://www.rynekelektryczny.pl>, dostęp: 30.07.2020
- [25] <https://globenergia.pl>, dostęp: 5.01.2021