

Zatłaczanie gazów ze źródeł odnawialnych do sieci gazowych

Renewable gas injection into the gas grid

Andrzej J. Osiadacz, Maciej Chaczykowski^{*)}

Słowa kluczowe: magazynowanie energii, odnawialne paliwa gazowe, energetyka wodorowa, jakość gazu

Streszczenie

W sytuacji nadwyżek podaży energii elektrycznej wytwarzanej z odnawialnych źródeł energii, zdolność magazynowania energii będzie odgrywała kluczową rolę w zarządzaniu systemami energetycznymi. W tym kontekście zyskują na znaczeniu kwestie pojemności magazynowej, bezpieczeństwa magazynowania, oraz szybkiego dostępu do zasobów magazynowanej energii. Technologie *Power-to-gas* w połączeniu z zatłaczaniem wodoru lub syntetycznego gazu ziemnego do sieci gazowej stwarzają możliwość wykorzystania istniejącej infrastruktury gazowniczej do magazynowania dużych ilości energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych w postaci energii chemicznej wyżej wymienionych paliw zatłaczanych do sieci gazowej. W referacie przedstawiono wybrane projekty demonstracyjne prowadzone w tym zakresie na świecie. Omówione zostały również dostępne w literaturze wyniki badań tolerancji elementów systemu gazowniczego na podwyższony udział wodoru w mieszaninie z gazem ziemnym, oraz perspektywy konwergencji systemów elektroenergetycznych, gazowniczych i ciepłowniczych w rezultacie rozwoju technologii kogeneracyjnych i technologii *Power-to-gas*.

Keywords:

Abstract

With the fluctuation and possible oversupply of electrical power generated by renewable energy sources, the capacity of storage plays a pivotal role in a future sustainable energy system. In that aspect the safe energy storage and its fast availability is gaining in importance. The production of renewable gas (hydrogen, biosynthetic natural gas) from surplus power in *power-to-gas* (P2G) plants creates the possibility of using the existing natural gas grids as a large energy storage. In this paper selected projects that demonstrate the viability of renewable gas injection into the gas grid are presented. The sensitivity of the elements of gas transmission and distribution systems to the higher hydrogen concentrations in natural gas mixtures is discussed. The process of the convergence of electrical and natural-gas grids as well as district heating systems thanks to the development of CHP and P2G plants is discussed.

1. Wstęp

Powszechnie stosowanymi nośnikami energii w energetyce gazowej są mieszaniny węglowodorów, których głównym składnikiem jest metan. W ostatnich latach czynione są próby wykorzystania jako nośnika energii również wodoru. Wodór nie występuje w przyrodzie w stanie wolnym ale jego zasoby w postaci związku z tlenem są praktycznie nieograniczone. Obserwuje się wyraźne zainteresowanie technologiami wodorowymi, m.in. ogniwami paliwowymi oraz silnikami tłokowymi zasilanymi wodorem. Wodór posiada właściwości, które zapewniają mu bardzo dobre własności użytkowe jako paliwu. Stężeniowe granice zapłonu w powietrzu od około 4% do około 75% obj. są bardzo szerokie w porównaniu z metanem, którego granice zapłonu licząc objętościowo zawierają się w zakresie od 5% do 15%. W przypadku gazów ziemnych wysokometanowych minimalna energia zapłonu jest rzędu kilku dziesiątych mJ, podczas gdy minimalna energia zapłonu wodoru jest o rząd wielkości mniejsza i wynosi kilka setnych mJ.

Podczas wysokociśnieniowego wypływu wodoru do atmosfery, np. w czasie awaryjnego wypływu z instalacji ciśnieniowej, wodór podlega zjawisku zapłonu dyfuzyjnego. Należy również, obok

acetyleny, do grupy gazów najłatwiej detonujących. Wszystko to sprawia, że wykorzystanie wodoru pociąga za sobą pewne problemy, szczególnie natury bezpieczeństwa. Dlatego też w zastosowaniach przemysłowych podejmuje się próby wykorzystania nie czystego wodoru, lecz jego mieszanin, na przykład z metanem i azotem. Wyniki badań eksperymentalnych wykazały znaczny wpływ domieszkowania metanu i azotu do wodoru na występowanie samozapłonu takiej mieszaniny. Obecność tych gazów powoduje poprawę warunków bezpieczeństwa magazynowania i transportu paliwa, m.in. poprzez zawężenie granic zapłonu i detonacji oraz zwiększenie minimalnej energii zapłonu.

Aktualnie, najtańszą i najbardziej popularną metodą produkcji wodoru jest reforming parowy gazu ziemnego. Jednak w ostatnich latach obserwowany jest wzrost zainteresowania produkcją wodoru w procesie elektrolizy wody z wykorzystaniem energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych. Technologia *power-to-gas* jest obiecującym rozwiązaniem z punktu widzenia możliwości bilansowania systemu elektroenergetycznego, bowiem nadwyżki energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych mogłyby być przeznaczone na produkcję wodoru, który następnie mógłby być zatłoczony do sieci gazowej w celu magazynowania uzyskanej w ten sposób energii chemicznej. Należy

^{*)} Andrzej J. Osiadacz, prof. dr hab. inż. – Politechnika Warszawska, ul. Nowowiejska 20, 00-653 Warszawa, email: andrzej.osiadacz@pw.edu.pl, Maciej Chaczykowski, dr hab. inż. – Politechnika Warszawska, ul. Nowowiejska 20, 00-653 Warszawa, email: maciej.chaczykowski@is.pw.edu.pl

podkreślić, iż średnio – i długoterminowe magazynowanie energii na potrzeby bilansowania systemu wymaga pojemności rzędu TWh. Tej skali pojemności magazynowe są możliwe do uzyskania jedynie w przypadku podziemnego magazynowania energii chemicznej, powszechnie wykorzystywanego w systemach gazowniczych w postaci podziemnych magazynów gazu w złożach szczypanych, warstwach wodonośnych i kavernach solnych. Niniejszy referat jest poświęcony projektowi demonstracyjnemu mającemu na celu wykazanie możliwości dostarczania wodoru do sieci gazowej, które obecnie są w fazie testowania w Europie i na świecie.

2. Technologia Power-to-gas

Szczegółowy przegląd 25 pilotażowych instalacji Power-to-gas w Europie i na świecie połączonych z zatłaczaniem wodoru do sieci zaprezentowano w pracy [1]. Najwięcej projektów zrealizowano w Niemczech (14) oraz Francji (3). Generalnie, 88% projektów zrealizowano w Europie. We wcześniejszej pracy [2] wymieniono 15 instalacji zatłaczających wodór do sieci gazowych (w tym 11 lokalizacji w samych Niemczech).

W instalacjach Power-to-gas mogą być stosowane elektrolizery alkaliczne, z polimerową membraną wymiany protonów oraz stałotlenkowe. Poziomy gotowości tych technologii są różne, a ich krótką charakterystykę podano w Tablicy 1.

Tablica 1. Typowe właściwości elektrolizerów: alkalicznych, PEM i SOE [3,4,5].

Table 1. Typical parameters of alkaline, PEM and SOE electrolyzers.

Technologia		Alkaliczny	PEM	SOE	AEM
Stopień zaawansowania technologicznego		Zaawansowane	Demonstracyjne	B+R	B+R
Typowa temperatura pracy ogniwa	°C	60-80	50-80	700-1000	50-60
Ciśnienie robocze ogniwa	bar	<30	<100	<30	<30
Gęstość prądu	A/cm ²	0,2-0,4	0,6-2	0,3-1	0,2-1
Napięcie w ogniwie	V	1,8-2,4	1,8-2,2	0,95-1,3	1,8-2,2
Gęstość mocy	W/cm ²	do 1	do 4,4	-	-
Produkcja wodoru	m ³ /h	<760	<30	-	<1
Okres eksploatacji ogniw	h	<75 000	<30 000	<40 000	-
Okres eksploatacji instalacji	lata	20-30	10-20	-	-
Czystość wodoru	%	>99,8	99,999	-	99,99
Czas rozruchu	min	15	<15	>60	-
Szacunkowy koszt	€/kW _{el}	1000	2000	-	-

Elektrolizery alkaliczne działają typowo przy temperaturze i ciśnieniu roboczym odpowiednio około 80°C i 30 bar. Zazwyczaj osiągają sprawności między (60-70)%. Komercyjnie dostępne moduły mają moc do 2,5 MW. W sensie stopnia rozwoju, technologia ta jest najbardziej zaawansowana i najtańsza. Wśród kilkudziesięciu projektów w skali laboratoryjnej (od 8,3 kW), a także wśród planowanych i zrealizowanych projektów demonstracyjnych (do 6MW) wymienionych w pracy [1], 60% instalacji wykorzystuje elektrolizery z membraną wymiany protonów (PEM), natomiast pozostałe oparte są na elektrolizerach alkalicznych. Elektrolizery stałotlenkowe (SOE) nie były wykorzystywane w instalacjach omawianych w powyższej pracy. Problemem w ich przypadku, w kontekście zastosowań w instalacjach *Power-to-gas*, może być wrażliwość na naprężenia termiczne ceramiki, w związku z wymogiem elastycznego trybu pracy i w efekcie częstymi przerwami w pracy elektrolizera.

Zaletą elektrolizerów PEM jest prosta konstrukcja i wysoka sprawność na poziomie (65-83)%. Są również przystosowane do szybkich zmian obciążenia. Ograniczeniem w ich stosowaniu jest jednak krót-

szy okres eksploatacji, wynikający z trwałości elektrolitu w postaci membrany wymiany protonów, i niewielkie wydajności w zakresie do 30 m³/h. Charakteryzują się również wyższym kosztem ze względu na płytynę wykorzystaną jako katalizator.

Sprawność elektrolizerów definiuje się jako

$$\eta = \dot{V}_{H_2} \cdot H_{s,H_2} / P_{el} \quad (1)$$

\dot{V}_{H_2} – nominalna wydajność,
 H_{s,H_2} – ciepło spalania wodoru (12,78 MJ/m³),
 P_{el} – moc elektrolizera.



Rys. 1. Instalacja zatłaczania wodoru do sieci. (Avacon) źródło: <https://hydrogen-central.com/eon-avacon-dvgw-20-percent-hydrogen-german-gas-network/>

Fig.1 Installation for hydrogen injection into gas network.

W większości projektów demonstracyjnych wodór produkowany w elektrolizerach jest następnie magazynowany w zbiornikach ciśnieniowych. Zakres ciśnienia roboczego zbiorników jest bardzo szeroki i wynosi od 4bar do 400 bar. Na przykład w przypadku stacji tankowania wodoru na potrzeby dystrybutorów wymagane jest wysokie ciśnienie robocze rzędu 300 bar. Wysokie ciśnienie pozwala na oszczędność powierzchni zabudowy zbiorników magazynowych, jednak zwiększa koszty instalacji, z powodu konieczności zabudowy sprężarki wodoru. Podobnie jak w stacjach tankowania sprężonego gazu ziemnego, w celu ograniczenia kosztów sprężania stosowane są zbiorniki buforowe, a proces tankowania odbywa się dopiero po ich napełnieniu. Innym sposobem ograniczenia kosztów sprężania jest zastosowanie elektrolizera ciśnieniowego. Dostępne są elektrolizery o ciśnieniu roboczym z zakresu (12-30) bar. Sprawność całkowita instalacji z elektrolizerami ciśnieniowymi jest o około 5% wyższa porównaniu do instalacji z elektrolizerami niskociśnieniowymi, jednak ze względu na wyższe nakłady inwestycyjne i koszty serwisowania, zaleca się stosowanie niskociśnieniowych elektrolizerów współpracujących ze sprężarkami wodoru.

Instalacją *Power-to-Gas* posiadającą największą wydajność produkcji wodoru była instalacja Energiepark Mainz w Nadrenii-Palatinacie (Niemcy). Otwarta w 2015 r. instalacja posiada elektrolizery PEM o mocy 3,75 MW. Produkowany wodór przeznaczony jest do zatłaczania do sieci gazowej 6-8 bar, o maksymalnym przepływie gazu 1200 m³/h i udziale wodoru 0-15%. Avacon, spółka zależna E.ON, rozpocznie dodawanie wodoru do sieci w Saksonii-Anhalt. W nadchodzącym okresie grzewczym do gazu ziemnego będzie dodawane stopniowo do 20 procent wodoru (Rys. 1).

3. Zatłaczanie wodoru do sieci gazowej

Kilka projektów demonstracyjnych, mających na celu wykazanie możliwości zatłaczania wodoru do sieci gazowej, jest obecnie w fazie projektowania lub eksploatacji w Europie i na świecie. Zatłaczanie wodoru lub metanu z instalacji *Power-to-gas* do sieci gazowej ma wiele zalet, ponieważ umożliwia integrację systemów elektroenerge-

tycznego i gazowniczego w celu magazynowania nadwyżek energii elektrycznej w postaci gazu produkowanego ze źródeł odnawialnych (elektronie wiatrowe i fotowoltaiczne).

Udział energii pozyskanej z wodoru w mieszaninie z gazem ziemnym możemy wyznaczyć z zależności

$$\phi = x_{H_2} H_{s,H_2} / \left[(1 - x_{H_2}) H_{s,GZ} + x_{H_2} H_{s,H_2} \right] \quad (2)$$

x_{H_2} – udział objętościowy wodoru,

H_{s,H_2} – ciepło spalania wodoru,

$H_{s,GZ}$ – ciepło spalania gazu ziemnego

Ciepło spalania mieszaniny gaz ziemny-wodór określa zależność

$$H_{s,m} = x_{H_2} H_{s,H_2} + (1 - x_{H_2}) H_{s,GZ} \quad (3)$$

Energiją dostarczoną przez mieszaninę gaz ziemny-wodór wyznaczamy z zależności

$$E_m = H_{s,m} \dot{V}_m \quad (3)$$

\dot{V}_m – strumień objętości mieszaniny

Podczas gdy zatłaczanie biometanu do sieci gazowej nie niesie ze sobą żadnego ryzyka, zatłaczanie wodoru może okazać się problematyczne [5,6,7], gdyż niesie ze sobą szereg pytań związanych z wrażliwością poszczególnych elementów systemu na podwyższone udziały wodoru w mieszaninie z gazem ziemnym. Generalnie, dopuszczalna ilość wodoru w sieci gazowej powinna być określana indywidualnie, biorąc pod uwagę strukturę sieci, skład gazu ziemnego, strumień gazu, wyposażenie odbiorców w urządzenia gazowe. Jednakże, poszczególne kraje starają się uogólnić wytyczne w tym zakresie. Na przykład dopuszczalne stężenie wodoru w gazie ziemnym w sieci przesyłowej w Holandii wynosi 2%obj. [2], natomiast analogiczna wartość podana w standardzie technicznym DVGW G 262 dla rynku niemieckiego wynosi 5%. Niemieckie stowarzyszenie naukowo-techniczne branży gazowniczego i wodociągowej (DVGW) zleciło partnerom w przemyśle i w ośrodkach naukowych przeprowadzenie badań w celu określenia maksymalnego dopuszczalnego stężenia wodoru w mieszaninie z gazem ziemnym w poszczególnych elementach systemu gazowniczego [6]. W raporcie końcowym określonych zostało pięć obszarów funkcjonalnych łańcucha dostaw gazu: (i) transport, (ii) magazynowanie, (iii) pomiar i regulacja, (iv) dystrybucja gazu i (v) użytkowanie, które obejmowały 30 procesów biznesowych. Dla każdego z procesów zostały zidentyfikowane dopuszczalne ilości wodoru, podane za pomocą trzech progów, w których: (i) mieszanie wodoru jest nieszkodliwe, (ii) wymagana jest adaptacja technologiczna, bądź regulacja administracyjna, oraz (iii) prace badawczo-rozwojowe są nadal potrzebne. Dane dotyczące wrażliwości elementów systemu gazowniczego na zawartość H₂ w gazie ziemnym przedstawiono na rys. 2-6 (zielony wykres – zakres nie stwarzający problemów, żółty – konieczność standaryzacji, niebieski – konieczne prace badawcze).

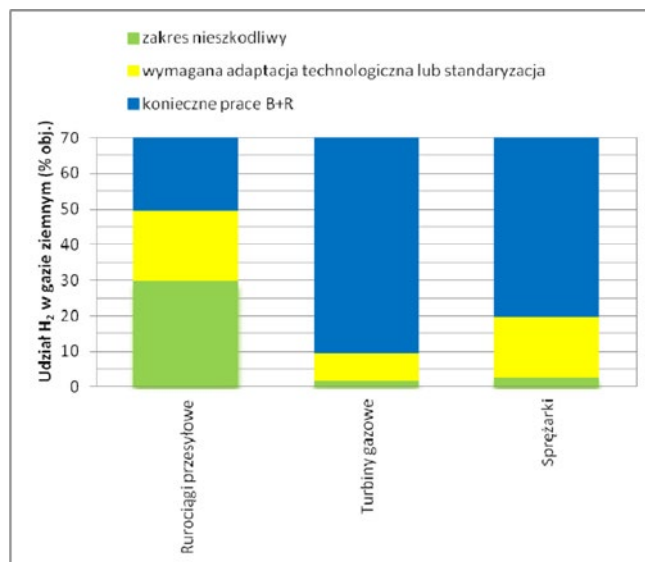
Na rys. 2. przedstawiono rezultaty ww. prac w odniesieniu do procesów związanych z transportem gazu. Zawartości wodoru w mieszaninie z gazem ziemnym uważane jako „niekrytyczne” zmieniały się od 50% dla materiału rurociągu, poprzez 20% w odniesieniu do pracy sprężarki, do 10% w odniesieniu do pracy turbiny gazowej.

Obecność wodoru w metalach i stopach powoduje niekorzystny wpływ na ich właściwości fizyczne, mechaniczne i elektrochemiczne, objawiający się m.in. zmniejszoną wytrzymałością mechaniczną i zwiększoną kruchością. Ponadto, wodór intensyfikuje przebieg procesów korozji stali i stopów. Pod wpływem oddziaływania wodoru w różny sposób przebiegają też procesy ich

niszczenia. Wodór który przeniknął do stali w znacznym stopniu zmienia jej właściwości mechaniczno-użytkowe, a stopień tych zmian jest zależny m.in. od składu chemicznego stali, mikrostruktury, stopnia zanieczyszczenia, a także od rodzaju zastosowanej obróbki cieplnej i mechanicznej, któremu została poddana. Nawodorowanie wywiera największy wpływ na jej właściwości wytrzymałościowe i plastyczne.

Wodór ze względu na małą średnicę atomu łatwo dyfunduje w strukturach krystalicznych żelaza nawet w temperaturze pokojowej. Badania wykazały, że przenikanie i dyfuzja wodoru w dużej mierze uzależniona jest od: struktury metalu, strumienia przenikania wodoru, temperatury, ciśnienia, stanu powierzchni, pierwiastków chemicznych znajdujących się w strukturze stali, a także stanu naprężenia. Wodór oddziałuje z defektami struktury, takimi jak dyslokacje, granice ziaren i faz oraz wtrącenia niemetaliczne. Oddziaływanie to, nazywane od mechanizmu działania, jako pułapkowanie, w znacznym stopniu modyfikuje transport wodoru i wpływa na przebieg niszczenia wodorowego metali.

Turbiny gazowe wyposażone w niskoemisyjne palniki z wstępnym wymieszaniami paliwa mogą być wrażliwe na obecność wodoru w paliwie, dlatego aktualnie dopuszczalny udział wodoru w paliwie ograniczono do 5%obj., a czasami nawet do 1%obj. Należy jednak podkreślić, że istnieje duży potencjał podniesienia ww. limitów, przykładowo niektórzy producenci turbin, np. Solar, Siemens, deklarują dopuszczalny udział wodoru w paliwie na poziomie odpowiednio 4%obj. oraz 15%obj. Ograniczenia w przypadku sprężarek dotyczą przede wszystkim koniecznego wzrostu strumienia gazu (przepustowości) kompensującego spadki kaloryczności mieszaniny gaz ziemny-wodór, w związku z koniecznością dostarczenia jednakowego strumienia energii (mocy zamówionej) przez system przesyłowy.



Rys. 2. Wrażliwość elementów systemu przesyłowego gazu na zawartość H₂ w gazie ziemnym [6]

Fig.2 Sensitivity of the transmission system components to the natural gas containing H₂.

Roczne zużycie gazu w Polsce kształtuje się na poziomie 180 TWh (około 16 mld m³). Przy tym poziomie zużycia jedynym dostępnym rozwiązaniem jeśli chodzi o długoterminowe magazynowanie gazu w odpowiedzi na sezonową nierównomierność zużycia jest zastosowanie podziemnych magazynów gazu. Problem nierównomierności dotyczy również zużycia energii elektrycznej, a zwiększone zapotrzebowanie na tzw. szczytowe moce wytwórcze pojawia się w przypadku dużego udziału źródeł odnawialnych w bilansie wytwarzania energii. Przykładowo w Niemczech prognozuje się, że przy 80% udziale odnawialnych źródeł energii

w bilansie wytwarzania energii (rok 2050), zapotrzebowanie na długoterminową pojemność magazynową (odpowiednio 17 dni) będzie wynosiło 7,5 TWh [8]. Technologie Power-to-gas w połączeniu z podziemnym magazynowaniem wodoru lub mieszanin gaz ziemny-wodór są aktualnie jedynym rozważanym rozwiązaniem przy tej skali pojemnościach magazynowych i przyjętym horyzoncie czasowym.

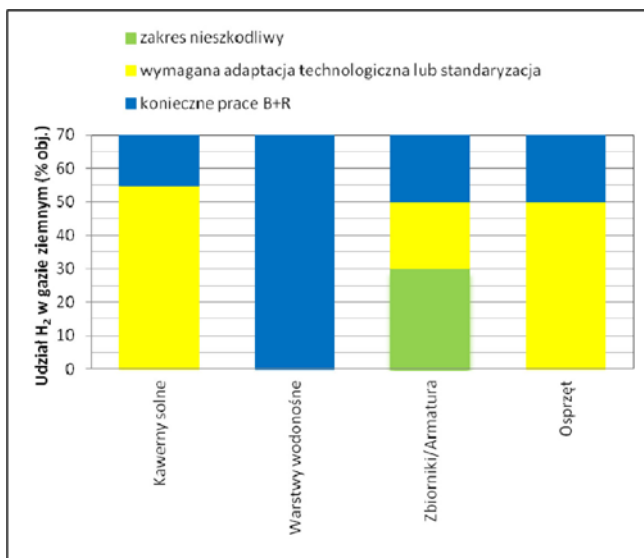
Wrażliwość elementów systemu magazynowania na podwyższony udział wodoru w mieszaninie z gazem ziemnym przedstawiono na rys. 3. Doświadczenia zebrane przy magazynowaniu gazu miejskiego, zawierającego do 90% wodoru na początku at 90. Pokazują techniczną możliwość. Największe problemy dotyczą magazynowania w strukturach zawodnionych, m.in. z uwagi na nieszczelności, ryzyko tworzenia się hydratów, sprzyjanie środowiska wilgotnego rozwojowi mikroorganizmów i procesowi korozji.

Wrażliwość aparatury kontrolno-pomiarowej na podwyższony udział wodoru w mieszaninie z gazem ziemnym przedstawiono na rys. 4. Problemy dotyczą głównie przeliczników objętości oraz chromatografów gazowych. W przypadku układów korekcyjnych, stosowane obecnie procedury wyznaczania współczynnika ściśliwości w oparciu o wirialne równanie stanu (SGERG-88 oraz AGA8-DC92) posiadają ograniczenia jeśli chodzi o udział wodoru w mieszaninie gazu ziemnego na poziomie 10%. Nowsze równanie stanu (GERG 2004) nie narzuca tego typu ograniczenia i pozwala na wyznaczenie gęstości dwuskładnikowej mieszaniny metan-wodór z niepewnością $\pm(0,07, 0,1)\%$ przy udziale molowym wodoru (15-75)% i w szerokim zakresie wartości temperatury i ciśnienia.

Największym problemem w obszarze urządzeń pomiarowych jest brak możliwości pomiaru obecności wodoru w mieszaninie z gazem ziemnym przy wyznaczaniu składu gazu ziemnego na potrzeby pomiaru kaloryczności we wszystkich chromatografach procesowych zainstalowanych przed 2013 r. W urządzeniach tych niemiecka administracja miar (PtB) narzuca górny limit udziału wodoru w mieszaninie na poziomie 0,2% [9].

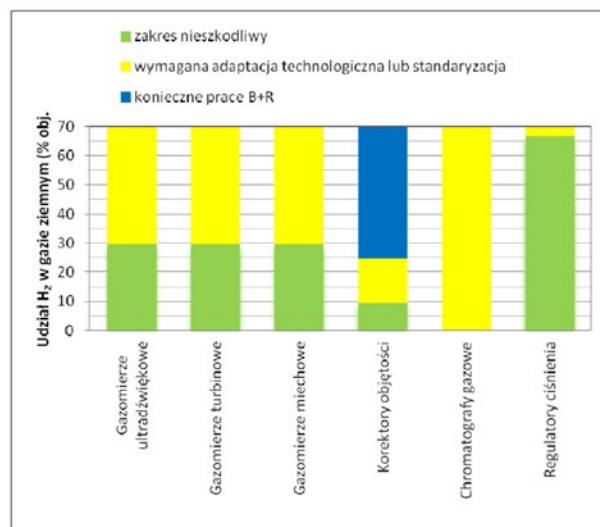
Na rys. 5. przedstawiono wyniki badań w oceny wpływu podwyższonych ilości wodoru w gazie ziemnym w systemach dystrybucyjnych. Rozwiązania techniczne stosowane w systemach dystrybucyjnych nie stwarzają przeszkód w zwiększeniu udziału wodoru w gazie ziemnym. Sygnalizowane 15% ograniczenie na udział wodoru w ogranicznikach przepływu wynika ze zmiany kaloryczności i strumienia gazu, powodujących wzrost prędkości przepływu strumienia w celu dostarczenia jednakowej ilości energii. Przykładowo mieszanina metan/wodór o udziałach masowych 85%/15% w sieciach dystrybucyjnych niskiego i średniego ciśnienia (nadm ciśnienie odpowiednio 10 i 400 kPa) będzie miała 1,7 razy większą prędkość przepływu w porównaniu z czystym metanem przy założeniu jednakowego strumienia energii dostarczanego gazu.

Wyniki badań wrażliwości odbiorników gazu na podwyższone udziały wodoru przedstawiono na rys. 6. Doświadczenia eksploatacyjne floty autobusów CNG w Szwecji (Malmö) pokazują, że domieszka 8%obj. wodoru do gazu ziemnego nie stanowi obecnie problemu, z perspektywą zwiększenia udziału do 20%. Istotny problem stanowi ograniczenie 2%obj. dla stalowych zbiorników w pojazdach zasilanych, zalecane w normie DIN 51624. Rozwiązaniem jest oczywiście zastosowanie zbiorników kompozytowych. Palniki kotłów i kuchni gazowych są przygotowane do spalania mieszaniny gazu ziemnego z wodorem, przy udziale wodoru do 10%obj. Wyższy udział wodoru wymaga regulacji urządzeń (np. wymiana dyszy w kuchni gazowej) w celu uzyskania jednakowej mocy palnika. W przypadku tłokowych silników spalinowych pracujących w układach kogeneracyjnych większe prędkości propagacji płonienia mieszanin gazu ziemnego z wodorem mają pozytywny wpływ na sprawność silnika i jednocześnie negatywny



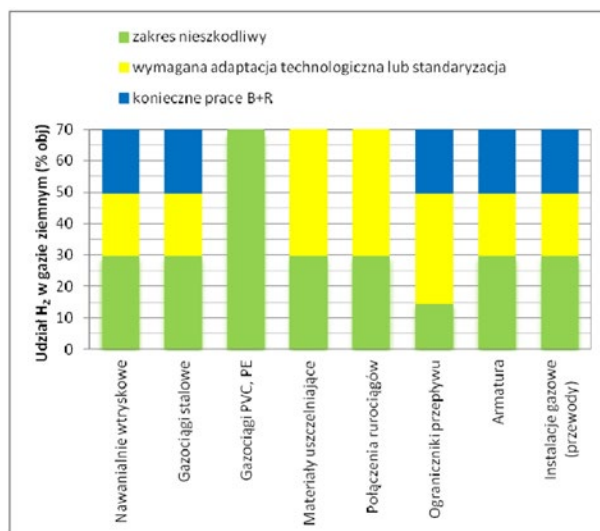
Rys. 3. Wrażliwość elementów systemu magazynowania na zawartość H₂ w gazie ziemnym [6].

Fig. 3. Sensitivity of the gas storage components to the natural gas containing H₂.



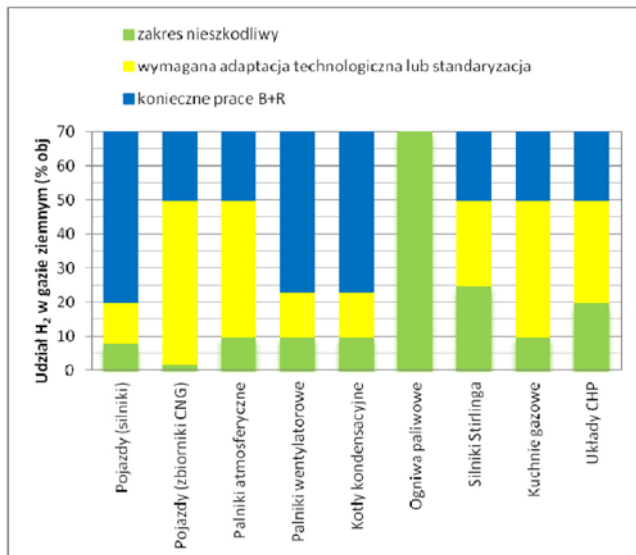
Rys. 4. Wrażliwość urządzeń pomiarowych i regulacyjnych na zawartość H₂ w gazie ziemnym [6].

Fig. 4. Sensitivity of the measurements and control elements to the natural gas containing H₂.



Rys. 5. Wrażliwość elementów systemu dystrybucyjnego na zawartość H₂ w gazie ziemnym [6].

Fig. 5. Sensitivity of the gas distribution network elements the natural gas containing H₂.



Rys. 6. Wrażliwość odbiorników gazu na zawartość H2 w gazie ziemnym [6]
Fig.6. Sensitivity of the gas appliances to the natural gas containing H2.



Rys. 7. Instalacja Power-to-gas w Falkenhagen, Niemcy (źr. E.ON)
Fig.7. Power to gas installation in Falkenhagen.

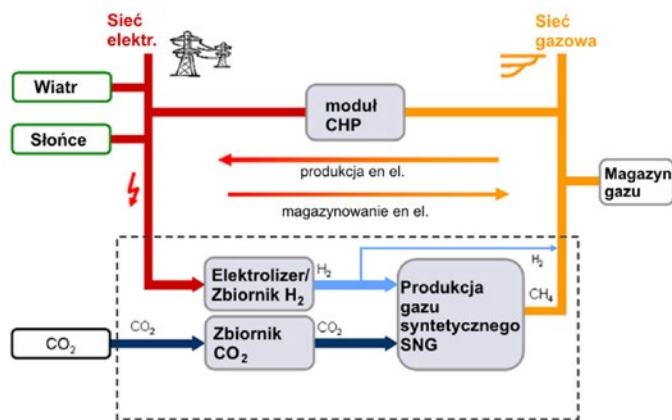
na poziom emisji tlenków azotu, jednak przy udziale wodoru nie przekraczającym 15%obj. ww. efekty nie są znaczące.

W związku z brakiem wytycznych odnośnie projektowania i budowy instalacji Power-to-gas opracowano nowy standard DVGW G 265-3 dotyczący projektowania i budowy instalacji załączania wodoru do sieci gazowej. Kwestie dostarczania wodoru do sieci poruszane są również w standardzie DVGW G 262, dotyczącym załączania biometanu [8].

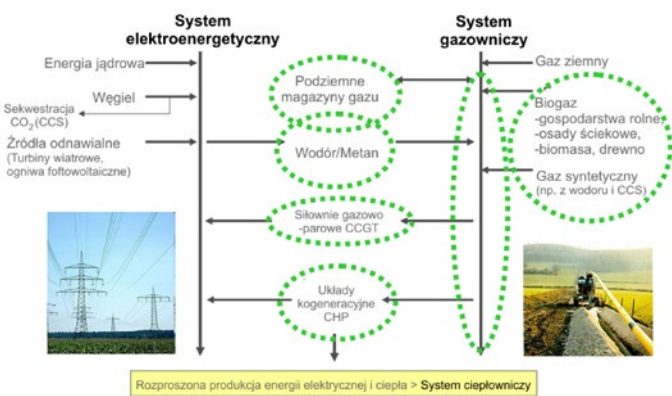
Przykładem pierwszej na skalę przemysłową instalacji załączającej wodór do sieci gazowej jest instalacja należąca do E.ON. w Falkenhagen we wschodnich Niemczech [10]. Otwarta w 2013 roku instalacja o mocy 2MW wytwarza nominalnie 360 m³/h wodoru załączanego do regionalnej sieci przesyłowej, której operatorem jest ONTRAS Gastransport. Zgodnie z materiałami prasowymi inwestora, nakłady inwestycyjne na budowę instalacji przekroczyły 5 mln. €.

4. Metanizacja wodoru

Interesującą koncepcją rozwiązania problemu ograniczeń ilości wodoru w mieszaninie z gazem ziemnym na potrzeby magazynowania energii odnawialnej w sieci gazowej jest wykorzystanie dwutlenku węgla do metanizacji wodoru. Rozważana jest przede



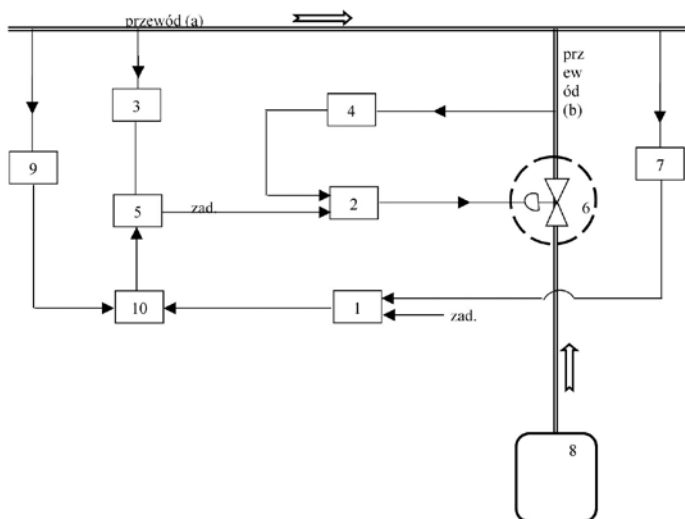
Rys. 8. Ideowy schemat procesu metanizacji wodoru w technologii Power-To-Gas
Fig. 8. Schematic diagram of the methanization process in PtG technology.



Rys. 9. Konwergencja systemu elektroenergetycznego, gazowniczego i ciepłowniczego
Fig. 9. Convergence of the electricity, gas and heating systems.

wszystkim reakcja Sabatiera [11], a także procesy metanogenezy biologicznej (przy udziale bakterii metanogennych) [12].

Przy produkcji metanu z wodoru mógłby być wykorzystany dwutlenek węgla obecny w spalinach z silników tłokowych i turbin gazowych, pracujących w układach CHP lub CCGT w energetyce. Jednocześnie zwiększenie udziału gazowych układów kogeneracyjnych CHP współpracujących z siecią ciepłowniczą, kosztem węglowych źródeł ciepła, pozwoli na dalsze ograniczenie



Rys.10 Układ dozowania wodoru do gazu ziemnego [14].
Fig.10. Schematic diagram of automatic system injecting H2 into gas pipeline.

nie emisyjności w sektorze ciepłowniczym. Zarysowana w ten sposób koncepcja, abstrahując od wysokich nakładów inwestycyjnych, prowadziłaby jednocześnie do rozwiązania problemu niskiej akceptacji technologii CCS (wychwytywania i składowania CO₂), której rozwój i komercjalizacja napotyka na silne bariery ze względu na problemy z akceptacją ze strony opinii publicznej.

5. Instalacja zatłaczania wodoru do sieci

Na rys. 10 przedstawiono opatentowany przez Politechnikę Warszawską układ dozowania wodoru do sieci gazowej, będący nadającym kaskadowym układem regulacji zastosowanym w celu uzyskania wysokiej jakości regulacji poprzez kompensację własności dynamicznych obiektu regulacji [14]. W procesie regulacji zakłada się kaskadowe działanie dwóch regulatorów, regulatora głównego (wiodącego) oraz regulatora pomocniczego (nadążnego). Zakłada się, że obydwaj regulatory zostaną zaprogramowane w jednym cyfrowym urządzeniu.

Układ dozowania wodoru do sieci gazowej działa na zasadzie automatycznej regulacji stosunku strumienia objętości wodoru do strumienia objętości gazu ziemnego. Składa się z dwóch regulatorów: głównego 1 i pomocniczego 2, dwóch przetworników przepływu: pierwszego 3 i drugiego 4, dwóch układów mnożących: pierwszego 5 i drugiego 10, sterowanego zaworu regulacyjnego 6, oraz dwóch przetworników zawartości wodoru: pierwszego 7 oraz drugiego 9. Wodór jest doprowadzany ze źródła wodoru 8. Wartością regulowaną jest natężenie przepływu wodoru wprowadzanego do sieci gazowej (a) w ilości zależnej od chwilowej wartości strumienia objętości gazu ziemnego i zawartego w nim wodoru. Wartością zadaną głównego regulatora 1 jest udział procentowy wodoru w mieszaninie gazu ziemnego z wodorem. Regulator przyjmuje ponadto na wejściu sygnał z przetwornika zawartości wodoru 7 zlokalizowanego na przewodzie gazu ziemnego a za układem zatłaczającym. Jednocześnie jest mierzona za pomocą przetwornika 9 zawartość wodoru w gazie ziemnym w przewodzie głównym (a). Sygnał wyjściowy z przetwornika 9 oraz z regulatora głównego 1 podawane są na wejścia układu mnożącego 10, gdzie następuje korekta sygnału wyjściowego podawanego na wejście drugiego układu mnożącego 5 w zależności od ilości wodoru zawartego w strumieniu głównym gazu ziemnego (a). Sygnał wyjściowy z układu mnożącego 10 modyfikuje w układzie mnożącym 5 wartość sygnału z przetwornika przepływu 3. Sygnał wyjściowy z elementu mnożącego 5 stanowi wartość zadaną regulatora pomocniczego 2. Różnicą pomiędzy wartością zadaną regulatora pomocniczego 2, a wartością wyjściową z przetwornika przepływu 4 powoduje zmianę strumienia przepływu wodoru w przewodzie (b) prowadzącym do sieci gazowej. Tak zbudowany układ automatycznej regulacji w którym w przewodzie głównym (a) jest mierzony przepływ gazu ziemnego za pomocą przetwornika przepływu 3 oraz zawartość wodoru za pomocą przetwornika 9, pozwala na pełną stabilizację zawartości wodoru w mieszaninie wyjściowej, niezależnie od tego czy w strumieniu gazu do którego wprowadzamy wodór znajdują się domieszki wodoru czy też jest to gaz czysty.

6. Wnioski

W artykule przedstawiono wybrane projekty demonstracyjne technologii Power-to-gas i omówiono problemy związane z wrażliwością poszczególnych elementów systemu gazowniczego na podwyższony udział wodoru w mieszaninie z gazem ziemnym.

Ilość wodoru, jaka może być bezpiecznie dodana do gazu ziemnego, w dużym stopniu zależy od składu gazu w punkcie zatłaczania, oraz od rodzaju urządzeń końcowych (odbiorników gazu) zainstalowanych w punktach wyjścia systemu (u odbiorców). W przypadku

ryzyka przekroczenia dopuszczalnych udziałów wodoru w mieszaninie z gazem ziemnym, wodór można poddać procesowi metanizacji, polegającemu na wytwarzaniu syntetycznego gazu ziemnego (SNG), który może być dostarczany do sieci gazowej w nieograniczonych ilościach, przy założeniu, że dysponujemy siecią o odpowiedniej przepustowości i akumulacyjności.

Opracowany układ dozowania wodoru do gazu ziemnego posiada następujące zalety:

- pozwala na pełną stabilizację zawartości wodoru w mieszaninie wyjściowej niezależnie od tego czy w strumieniu gazu do którego wprowadzamy wodór znajdują się domieszki wodoru czy też jest to gaz czysty,
- zbudowany jest z typowych elementów automatyki dostępnych na krajowym rynku,
- jest znacznie tańszy od oferowanych w tej chwili w Europie produktów innych producentów/dostawców.

LITERATURA:

- [1] Quarton, C.J., Samsatli, S. *Power-to-gas for injection into the gas grid: What can we learn from real-life projects, economic assessments and systems modelling?* Renewable and Sustainable Energy Reviews 2018; 98, 302-316.
- [2] Grond L., Schulze P., Holstein J., *Systems analyses Power to Gas: A technology review*, TKI Gas project TKIG01038, DNV GL (2014)
- [3] Cudny M., *Technologie power to gas*, Praca dyplomowa magisterska, Zakład Systemów Ciepłowniczych i Gazowniczych, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska (2015)
- [4] 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*, International Journal of Hydrogen Energy 2015; 12: 4285–4294
- [5] Miller, H. A., Bouzek, K., Hnat, J., Loos, S., Bernäcker, C. I., Weißgärber, T., Röntzsch, L., Meier-Haack, J., *Green hydrogen from anion exchange membrane water electrolysis: a review of recent developments in critical materials and operating conditions*, Sustainable Energy & Fuels 2020; 4(5): 2114-2133.
- [6] Altfeld K., Pinchbeck D., *Admissible hydrogen concentrations in natural gas systems*, DIV Deutscher Industrieverlag, gas for energy 03/2013
- [7] Müller-Syring G., Henel M., Köppel W., Mlaker H., Sterner, M. Höcher, T., *Entwicklung von modularen Konzepten zur Erzeugung, Speicherung und Einspeisung von Wasserstoff und Methan ins Erdgasnetz*. DVGW-Projekt G1-07-10, (2013)
- [8] Melaina M. W., Antonia O., Penev M., *Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks: A Review of Key Issues Technical*, Report NREL/TP-5600-51995, National Renewable Energy Laboratory (2013)
- [9] Adamek F. i in. *Energiespeicher für die Energiewende. Speicherungsbedarf und Auswirkungen auf das Übertragungsnetz für Szenarien bis 2050*, VDE-Studie, Frankfurt (2012).
- [10] Spohn D., Klaas E., IGU Working Committee 4 “Distribution” 2012-2015 Triennium Work Report, World Gas Conference, Paris (2015)
- [11] Schneider G. *Storage of wind power in natural gas grids – „Power to Gas“* Falkenhagen, w materiałach: European Gas Technology Conference EGA-TEC2013, Paryż (2013)
- [12] Schaaf T., Grünig J., Schuster M.R., Rothenfluh T., Orth A. *Methanation of CO₂ – storage of renewable energy in a gas distribution system*, Energy, Sustainability and Society 2014; 3:2-14
- [13] Reuter M. *Power to Gas: Microbial Methanation, a Flexible and Highly Efficient Method*, Microb Energy GmbH; Viessmann; w materiałach: Group Exhibit Hydrogen + Fuel Cells, Hannover Messe (2013)
- [14] Osiadacz A.J., Kwastarzewski M., Chaczykowski M., *Układ oraz sposób dozowania wodoru do sieci gazowej*. Wynalazek chroniony. Numer patentu: PL 237532, Publikacja patentu: [WUP 19-04-2021]