

Transformacja wodorowa, ale jaka? – część druga

Hydrogen Transformation, but What Kind? – Part Two

Robert Godzwon*

Słowa kluczowe: wódór, transformacja, Eco-LPG, sprawność, benzyna, olej napędowy, CNG, ciśnienie, LNG, LH2, wodorki, mobilne, ekonomia, efektywność,

Streszczenie

W artykule poruszono tematy związane z transformacją wodorową, w kontekście sprawności energetycznej, jak i kontekście logistycznej technologii wodorowych. Większości społeczeństwa uważa, że technologia jest warunkowana przez wytwarzanie wodoru. W artykule poruszono ważniejszy problem w technologii wodorowej, a więc sprawność procesu w odniesieniu do magazynowania wodoru i dystrybucji.

Keywords: hydrogen, transformation, Eco-LPG, efficiency, petrol, diesel, CNG, pressure, LNG, LH2, hydrides, mobile, economy, effectiveness

Abstract

The article discusses topics related to hydrogen transformation in the context of energy efficiency and the context of hydrogen logistics. Most people have the impression that technology is conditioned by hydrogen production. This article aims to address a much more important issue in hydrogen technology, namely the efficiency of the process in relation to hydrogen storage and distribution.

Wstęp

Główną wadą wszelkich rozwiązań, dotyczących technologii wodorowych, jest sama istota wodoru, a więc przede wszystkim wielkość jego atomu oraz to, że jest on najlżejszym pierwiastkiem w układzie okresowym. W procesie wytwarzania wodoru jest jeszcze wiele do zrobienia. Istnieje także wiele możliwości dalszej poprawy obszarów problemowych, czyli np. zwiększenia sprawności całego łańcucha – od wytwarzania, poprzez dystrybucję do wykorzystania wodoru. Wódór, pomimo wysokiego ciepła spalania w odniesieniu do jednostki masy, to ma jednak niską gęstość w warunkach normalnych, co powoduje, że ciepło spalania wodoru w odniesieniu do jednostki objętości jest niewielkie [16]. Rodzi to wiele problemów zarówno technologicznych, materiałowych, energetycznych, jak i bezpieczeństwa użytkowania.

W procesie spalania wódór nie emituje dwutlenku węgla, co jest bardzo dużą zaletą tego paliwa, niemniej jednak najtańsza metoda pozyskiwania wodoru – konwersja metanu metodą reformingu parowego [17] – należy do technologii emisyjnych. Świat musi opanować efektywną ekonomicznie bezemisyjną metodę wytwarzania wodoru na skalę przemysłową ze źródeł odnawialnych oraz metody jego magazynowania.

Magazynowanie wodoru

Istnieje co najmniej kilka znanych metod magazynowania wodoru jako paliwa. Poniżej przedstawiono podstawowe kierunki i rozwijane metody magazynowania wodoru.

a) Magazynowanie jako sprężony gaz – CGH2

Wódór gazowy może być sprężony i przechowywany w zbiornikach ciśnieniowych (CGH2: sprężony wódór gazowy), które muszą wytrzymać bardzo wysokie ciśnienia. Taka metoda magazyno-

wania jest obecnie preferowana zarówno w zastosowaniach stacjonarnych jak i mobilnych. Magazynowanie sprężonego gazu pod ciśnieniem nawet 700 bar jest jak dotąd najbardziej zaawansowanym rozwiązaniem [12]. Jednakże, jest tutaj jeszcze wiele problemów technicznych, dotyczących zwłaszcza obszaru materiałowego. Przykładowo, przenikanie wodoru, przez ścianki zbiornika powoduje korozję wodorową tego zbiornika. Dotyczy to wszystkich materiałów a nie tylko zbiorników stalowych [19]. Powoduje to również straty wodoru po pewnym okresie użytkowania zbiorników. Należy także wziąć pod uwagę wszelkie aspekty bezpieczeństwa dotyczące wodoru. Oprócz tego, że wódór tworzy mieszaninę wybuchową, to mamy tu również do czynienia z bardzo wysokimi ciśnieniami.

b) Magazynowanie jako ciekły wódór (wódór skroplony) – LH2

Wódór może być również przechowywany w stanie ciekłym, przy znacznie większej gęstości i w temperaturze – 253 °C (LH2: ciekły wódór) [9]. Skraplanie wodoru jest skomplikowane technicznie i energochłonne. Konstrukcja i produkcja zbiorników kriogenicznych jest bardzo skomplikowana a także jest niewiele materiałów, które są w stanie wytrzymać tak niskie temperatury. Nawet zbiorniki kriogeniczne które dedykowane są do materiałów typu ciekły tlen czy azot nie nadają się do przechowywania wodoru w stanie ciekłym [6]. Utrzymanie temperatury, dokonuje się przez zjawisko zachowania równowagi ciecz-para, dzięki któremu utrzymuje się niską temperaturę wewnątrz zbiornika. Wadą jest to, że ciekły wódór może parować w wyniku ogrzewania nie tylko z powierzchni styku faz (tzw. zjawisko boil-off), co może z kolei pociągnąć za sobą niekontrolowaną erupcję gazu. Do wyzwań technicznych związanych z przechowywaniem wodoru w postaci skroplonej można też zaliczyć problemy z przetaczaniem ciekłego wodoru, oraz to, że zbiorniki jak i całe

* Robert Godzwon, inż., Mastertechprojekt Sp. z o.o. Szczecin, 71-004 Szczecin, ul. Cukrowa 63/1b, koordynator ds. instalacji PV i technologii wodorowych

instalacje muszą być w stałej bardzo niskiej temperaturze. Ciekłe media kriogeniczne trudno też opomiarować (mierzyć). Praktycznie nadają się do tego jedynie przepływomierze Coriolisa [10].

c) Magazynowanie przez absorpcję w wodorkach metali

Wodór wykazuje duże powinowactwo do tworzenia związków chemicznych z metalami lub ich stopami, tzw. wodorki metali, które umożliwiają przechowywanie wodoru w stanie stałym [13]. Kiedy wodór wchodzi w kontakt z powierzchnią materiału magazynującego, cząsteczki wodoru rozpadają się na wodór atomowy i wnikają do wewnętrznej struktury materiału nośnika. Wadą tego rozwiązania jest jednak stosunkowo duża masa materiału magazynującego w porównaniu do zaabsorbowanego wodoru (ok. 2% wagowych, dla Toyoty Mirai 2 [24] – złożo musiałoby być o wadze 280 kg i do tego należy doliczyć wagę samego zbiornika na złożo, oraz wagę systemu do napełniania i opróżniania złoża z wodoru). Należy również zwrócić uwagę, na fakt, że proces ładowania jak i odzyskiwania wodoru jest długi i dość skomplikowany. Taki sposób magazynowania uznaje się jednak za względnie bezpieczny.

d) Alternatywne formy magazynowania wodoru – nośniki wodoru

Aby w alternatywny sposób sprostać wyzwaniom związanym z utrzymaniem wysokiego ciśnienia lub niskiej temperatury, do przechowywania wodoru można stosować tzw. nośniki chemiczne jako formy przechowywania wodoru. Wykorzystują one technologie oparte na fizycznym lub chemicznym wiązaniu wodoru z inną substancją. Odwracając ten proces wodór jest uwalniany z nośnika. Nośnikami mogą być zarówno substancje stałe jak i znacznie bardziej popularne nośniki ciekłe. Przykładami systemów z wykorzystaniem nośników ciekłych mogą być uwodornione substancje organiczne, takie jak alkohole, uwodornione oleje, amoniak czy układ metylo- cykloheksan-toluen [4].

Rodzaj optymalnego sposobu magazynowania wodoru zawsze zależy od konkretnego zastosowania. Metody magazynowania wiążą się również z możliwościami transportu jak i metodami przeładunku danych substancji. Każdy sposób magazynowania wodoru – gazowy, ciekły, stacjonarny, mobilny lub w nośniku ma swoje zastosowanie. Konkretna aplikacja dyktuje jaką technologię magazynowania należy zastosować, w związku z czym należy zmierzyć się z poniższymi wyzwaniami.

- Należy wziąć pod uwagę ogólną sprawność łańcucha konwersji energii (np. energia elektryczna – wodór – energia elektryczna).
- Należy wziąć pod uwagę wysoką palność lub zakres palności samego wodoru i substancji pośrednich wykorzystywanych do magazynowania wodoru.
- Optymalizacji objętości magazynowych – przechowywanie dużych ilości stanowi wyzwanie ze względu na dużą pojemność, zwłaszcza w pojazdach.
- Niebezpieczeństwa wysokiej lotności wodoru, który może się łatwo ulotnić przez jakiegokolwiek mikro i makro nieszczelności.
- Konieczności zachowania odpowiednich temperatur i ciśnień, np. w przypadku CGH2 czy LH2.

Z powyższego nasuwają się wnioski:

- Należy unikać wodoru atomowego. Najlepiej, gdyby wodoru nie było w procesie, oczywiście w znaczeniu pierwiastkowym.
- Żadna z tych metod nie ma zalet, a jedynie większą bądź mniejszą ilość wad.

Przeprowadzona powyżej krótka analiza sugeruje, że kluczem do transformacji wodorowej jest sposób magazynowania wodoru. Dla świata nauki wyzwaniem jest magazynowanie wodoru i świat naukowy skupia się na poszukiwaniu rozwiązań umożliwiających przeskoczenie tych barier.

Można byłoby się zastanowić czy transformację wodorową, można przeprowadzić w inny sposób niż w ten o jakim zwyczajowo

obecnie się myśli, tzn. tak aby transformacja wodorowa dotyczyła tylko istniejących nośników energii i nie wymagała przebudowy całej gospodarki. Wydaje się, że jedynym takim rozwiązaniem jest wytworzenie z wodoru obecnie używanych nośników energii, które są łatwo przechowywane w normalnych warunkach, czyli takie nośniki jak: benzyna, olej napędowy i opały lub takich jak jest LPG, czy wreszcie Eko-LPG [22]. LPG należy rozumieć jako mieszanina propanu i butanu. Pomimo, że nazwa mówi, że jest to gaz, to obecnie jest w większości produkowany z ropy naftowej (Liquefield Petroleum Gas). LPG jest wyjątkowym paliwem, gdzie stosunek stechiometryczny wodoru do węgla jest bardzo wysoki i ma zastosowanie zarówno w gospodarstwach domowych, w przemyśle i transporcie a zarazem jest łatwy do skroplenia i przechowania i dzięki temu jest wszechstronny i zapewnia dużą wydajność energetyczną. LPG ma wysoką wartość energetyczną i czystość spalania, co wyraźnie widać w porównaniu z węglem czy drewnem. W konsekwencji, LPG emituje zdecydowanie mniej zanieczyszczeń. W przypadku, gdy węgiel będzie pochodził z „atmosfery” (CO₂), a wodór z wody, to takie LPG można będzie nazwać w pełni ekologicznym nośnikiem energii. Gdy jeszcze uwzględni bezpieczeństwo w użytkowaniu LPG, oczywiście pod warunkiem zachowania odpowiednich procedur, oraz możliwość łatwego jego przechowywania i zarazem łatwość transportu, można powiedzieć, że LPG jest wręcz idealnym paliwem.

Rozważając alternatywny sposób transformacji energetycznej z wykorzystaniem „Eco-LPG” warto zastanowić się jeszcze nad dwiema poniższymi kwestiami:

- sprawności całkowitej procesu energia elektryczna – wodór-energia elektryczna,
- transportu wodoru pod względem logistycznym, z pominięciem kwestii kosztowych.

W zdecydowanej większości opracowań podaje się sprawność łańcucha energia elektryczna – wodór-energia elektryczna na poziomie 34–44 % [23], pomijając problem magazynowania. Jeśli uwzględni się proces magazynowania dla skroplonego wodoru to uzyska się sprawność na poziomie 20-25%, natomiast w przypadku sprężania wodoru to sprawność ta będzie na poziomie 15-20%. Uśrednione wartości sprawności całkowitej dla różnych modeli zawiera Tab. 1. Dla lepszego zobrazowania nakreślonego powyżej zagadnienia można posłużyć się przykładem parowozu, gdzie sprawność to 10-20%, lecz należy jeszcze wziąć pod uwagę, że sprawność parowozu rozumie się jako energię użytkową (energia mechaniczna – uciąż). W przypadku aplikacji wodorowych pomija się sprawność źródeł energii elektrycznej, a zatem elektrowni wiatrowej, elektrowni konwencjonalnej, paneli fotowoltaicznych itp. oraz sprawność odbioru. Ten aspekt jest po prostu pomijany.

Trudno jest jednoznacznie wyjaśnić, dlaczego autorzy opracowań, np. [20] [21] podają, że proces sprężania wodoru ma sprawność 80-90% jeśli układ silnik hydrauliczny i siłownik hydrauliczny posiadają sprawność poniżej 90%, a układy sprężające wodór to wielostopniowe układy hydrauliczne (od 3-5 stopni) oparte na pompach i siłownikach hydraulicznych [15]. Widać, że generalnie aspekt magazynowania wodoru to temat nie tyle pomijany, co raczej upraszczany, zwłaszcza przez promotorów transformacji wodorowych.

Drugim ważnym zagadnieniem jest ogólnie pojęta logistyka dotycząca paliw. Aby to zobrazować załóżmy, że w Polsce, udałoby się stworzyć swoisty mix samochodowy (wg niektórych źródeł mamy w Polsce około 30 mln. samochodów). Dla łatwiejszej symulacji załóżmy, że są to tylko samochody osobowe, z czego 10 mln to samochody wodorowe. Należy przy tym porównać dystrybucję poszczególnych nośników energii: benzyna, olej napędowy, LPG, CNG, LNG, LH2, C, sprężony H2, przy założeniu standardowych środków dystrybucji oraz uśrednionych parametrów samochodów osobowych.

Przykładowe średnie parametry dystrybucyjne, środków dystrybucji poszczególnych nośników energii [25,2,7,8] podano poniżej:

Tabela 1. Sprawność ogólna procesów energia elektryczna – wodór – energia – energia elektryczna bez i z magazynowaniem wodoru

Table 1. Overall efficiency of the electricity – hydrogen – energy – electricity processes without and with hydrogen storage

| Sprawność poszczególnych etapów | Bez magazynu wodoru | Z magazynem skroplonego wodoru | Z magazynem w postaci sprężonego wodoru /700 at/ |
|---------------------------------------|---------------------|--------------------------------|--|
| Elektroliza wody 60-70% [11] | 65% | 65% | 65% |
| Skraplanie wodoru 70%, [3] | | 70% | |
| Sprężanie wodoru [14] | | | 52% |
| Sprawność ogniwa wodorowego 40-65% [] | 53% | 53% | 53% |
| Sprawność ogólna | 34% | 24% | 18% |

1. Benzyna – naczepa o objętości ładunku 37860L i masie ładunku 28300 kg [25];
2. Olej napędowy – naczepa o objętości ładunku 33974L i masie ładunku 28300 kg [25];
3. LPG – naczepa o objętości ładunku 49294L i masie ładunku 22000 kg [2];
4. CNG – naczepa o masie ładunku 7704 kg [7];
5. CH₂ – naczepa o masie ładunku 847 kg [8];
6. LNG – pominię ze względu na brak możliwości wykorzystania w samochodach osobowych /zjawisko boil-off, które wymusza ciągłą pracę układu napędowego;
7. LH₂ – pominię ze względu na brak możliwości wykorzystania w samochodach osobowych /zjawisko boil-off, które wymusza ciągłą pracę układu napędowego.

Uśrednione parametry samochodów osobowych w zależności od wykorzystywanego nośnika energii:

1. Benzyna – zużycie paliwa 6 L/100 km, poj. zbiornika paliwa 60L
2. Olej opałowy – zużycie paliwa 6 L/100 km, poj. zbiornika paliwa 55L
3. LPG – zużycie paliwa 8,4 L/100 km, poj. zbiornika paliwa 45L
4. CNG – zużycie paliwa 5,6 kg/100 km, poj. zbiornika paliwa 25kg
5. CH₂ – zużycie paliwa 1 kg/100 km, poj. zbiornika paliwa 5,6kg /Toyota Mirai/ [9]

Jeśli założymy, że mamy po 10 mln samochodów na sprężony wodór, sprężony gaz ziemny, LPG, benzynę i olej opałowy i będziemy je tankowali raz w tygodniu, to dla porównania możemy stworzyć tab.3.

Aby mieć pełniejszy przegląd tych technologii to należy przeanalizować alternatywy w postaci samochodów elektrycznych.

Tabela 2. Zasięgi samochodów osobowych oraz ilość samochodów możliwa do zatankowania z cysterny do przewożenia danego rodzaju paliwa

Table 2. Ranges of passenger cars and the number of cars that can be refueled from a tanker for transporting a given type of fuel

| Rodzaj paliwa | J/m | sprężony H ₂ | CNG | LPG | Benzyna | ON |
|---|----------|-------------------------|--------|---------|---------|--------|
| Masa ładunkowa cysterny | kg | 847 | 7704 | 22200 | 28300 | 28300 |
| Pojemność ładunkowa cysterny | L | | | 49294 | 37860 | 33994 |
| Pojemność zbiornika w samochodzie osobowym | kg | 5,6 | 25 | | | |
| Realna pojemność zbiornika w samochodzie osobowym | L | | | 45 | 60 | 55 |
| Średnie zużycie paliwa | kg/100km | 1 | 5,6 | | | |
| Średnie zużycie paliwa | L/100km | | | 8,4 | 6 | 5,5 |
| Zasięg samochodu osobowego | km | 560 | 446 | 536 | 1000 | 1000 |
| Ilość zatankowanych samochodów | l | 151 | 308 | 4933 | 472 | 515 |
| Łączny zasięg wszystkich samochodów osobowych z jednej cysterny | km | 84700 | 137571 | 2642857 | 471667 | 514545 |
| Ilość cystern określona przez zasięg samochodów na LPG | km | 3,1 | 1,9 | 1 | 0,6 | 0,5 |

Tabela 3. Logistyka dystrybucji danego paliwa w odniesieniu do zasięgu 10 mln samochodów osobowych na LPG i inne paliwa

Table 3. Distribution logistics of a given fuel in relation to the range of 10 million passenger cars using LPG and other fuels

| Rodzaj paliwa | J.m. | Sprężony wodór | Sprężony gaz ziemny | LPG | Benzyna | Olej opałowy |
|---|--------|----------------|---------------------|--------|---------|--------------|
| Ilość paliwa dystrybuowanego | T | 56000 | 250000 | | | |
| Ilość paliwa dystrybuowanego | M3 | | | 450000 | 600000 | 550000 |
| Całkowity zasięg samochodów osobowych | mln km | 5600 | 4464 | 5357 | 100000 | 100000 |
| Ilość transportów wymaganych do dystrybucji paliwa | l/tyg. | 66116 | 32451 | 2027 | 21201 | 19435 |
| Ilość transportów wymaganych do dystrybucji paliwa | l/24h | 9445 | 4636 | 290 | 3029 | 2776 |
| Ilość transportów wymaganych do dystrybucji paliwa | l/h | 394 | 193 | 121 | 126 | 116 |
| Ilość naczep będące w którejś fazie dostawy przy średni czasie transportu – 3h /załadunek, transport, rozładunek, powrót/ | l | 1181 | 579 | 362 | 379 | 347 |
| Ilość cystern będących w którejś z faz dostawy przy średni czasie transportu – 3h /załadunek, transport, rozładunek, powrót/ dla zasięgu określonego przez zasięg samochodów osobowych na LPG | l | 3684 | 1113 | 362 | 212 | 178 |
| Mnożnik ilości cystern będących w którejś z faz dostawy przy średni czasie transportu – 3h /załadunek, transport, rozładunek, powrót/ dla zasięgu określonego przez zasięg 10 mln samochodów osobowych na LPG | l | 10,18 | 3,08 | 1 | 0,59 | 0,49 |

Samochód elektryczny zużywa ok. 18 kWh/100 km i ma zasięg 350 km /w zależności od warunków atmosferycznych/. Aby naładować 10 mln samochodów raz w tygodniu, należy dostarczyć 180 MWh energii elektrycznej. Natomiast, dla przejechania łącznego zasięgów samochodów LPG /5357 mln km/ należy dostarczyć 964260 MWh energii elektrycznej. Zakładając, że do ładowania samochodów energią elektryczną używamy ultraszybkich ładowarek o mocy 150 kW, potrzebujemy 6 428,4 tys. godzin ładowania tygodniowo, aby to zrealizować potrzebujemy ok. 38264 takich ładowarek, a każda z nich pracuje 24/24 h. Zasilania takiej ładowarki wymaga kabla 5x240 mm², /kabel miedziany o średnicy ok. 4 cm i wadze 1 mb – 12,25 kg, promień gięcia to 0,7 Om/. Według GUS [24] średnio roczne zużycie energii w gospodarstwie domowym czteroosobowym to 2480 kWh rocznie, a do zasilania tygodniowo 10 mln samochodów potrzebujemy 964260 MWh, co odpowiada to rocznemu zużyciu energii przez około 389 tys gospodarstw domowych w ciągu roku.

Wnioski:

Warto zwrócić uwagę, że aby zatankować raz w tygodniu 10 mln samochodów to, w przypadku LPG musimy zrealizować 2027 dostaw, a w przypadku wodoru 66116 dostaw, a dla benzyny 21201 dostaw. Jeżeli uwzględnimy skorelowany zasięg wszystkich samochodów do samochodów LPG, to w wypadku wodoru musimy utrzymywać flotę cystern w ilości: dla wodoru – 3684, CNG – 1113, dla samochodów LNG – 362, dla benzyny 212, oleju napędowego tylko 178. Można powiedzieć, że na każdą cysternę LPG, /aby mieć ekwiwalent w przejechanych kilometrach/ musimy dostarczyć ponad dziesięć cystern wodoru, CNG ponad 3 cysterny, dla benzyny trochę więcej niż połowę cysterny a dla oleju napędowego trochę mniej niż połowę cysterny.

W 2021r. w Polsce zużyto łącznie benzyny i oleju napędowego 23,5 mln ton. Do dystrybucji tych paliw użyto 830 tys. standardowych dostaw. Aby rozwieźć równoważnik w postaci wodoru, to należałoby zorganizować ok 15,6 mln dostaw, tj. około 1,8 tys. na godzinę. W przypadku, gdyby ilość zużytego LPG zastąpić wodorem, które w 2021 roku zużycie wyniosło 2,5 mln ton LPG, to musielibyśmy dodać jeszcze ok. 130 dostaw na godzinę (bez uwzględnienia CNG/ [18]. A więc na drogach poruszałyby się non stop ok. 5,7 tys. samochodów z naczepami. Wyobraźmy sobie korek ciągników siodłowych z naczepami z Warszawy do Łudź.

Należy sobie zadać pytanie, „czy nasz kraj jest na to gotowy”, czy w ogóle na świecie istnieje kraj, który jest na to gotowy, no może z wyjątkiem takich krajów jak Luksemburg, Monako itp. Nic tu nie wspominałem o kosztach transformacji, ale, można sobie wyobrazić, że technologia wodorowa będzie zdecydowanie droższa od technologii, którą obecnie mamy, tak jak elektrownia atomowa jest droższa od elektrowni węglowej. Transformacja wodorowa jest i ma być dla środowiska, jeśli przeprowadzimy ją zgodnie z celami, dla których ją tworzymy, to wygramy, jeśli nie to w konsekwencji okaże się, ona następnym polem do zarobku dla pewnych grup.

LITERATURA

- Barzantny Wojciech, Marcel Kostowski. 2022. „Efektywność energetyczna i środowiskowa wybranych metod wykorzystania wodoru”. *Energetyka Wrzesień*.
- Barzantny Wojciech, Marcel Kostowski. 2022. „Efektywność energetyczna i środowiskowa wybranych metod wykorzystania wodoru”. *Energetyka Wrzesień*.
- Chmielniak Tadeusz, Sebastian Lepszy, Paweł Mońka. 2017. „Energetyka wodorowa – podstawowe problemy”. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* 20 (3): 55–66 ISSN 1429-6675.
- Dudek Magdalena. 2023. „Czy wodór może być magazynem i nośnikiem energii w budownictwie?” zesz. 9.
- Dzirba D. G. Rosłonek. 2018. *Przemysł Gazowniczy* nr 4(60):54-55.
- Folentarska Agnieszka, Damian Kulawik, Wojciech Ciesielski, Volodymyr Pavlyuk. 2016. „Nowoczesne materiały do przechowywania wodoru jako paliwa przyszłości”. Instytut Chemii, Ochrony Środowiska i Biotechnologii, Wydział Matematyczno – Przyrodniczy, Akademia im. Jana Długosza w Częstochowie, Częstochowa 2016 Jan Długosz University, Częstochowa Chem. Environ. Biotechnol., 2016, 19, 125–130 Styczeń 2024.
- Godzwon Robert. 2024. „Transformacja wodorowa. Ale jaka?”. *Gaz Woda i Technika Sanitarna* (7-8):2-4.
- Graff Marek. 2020. „Wodór jako paliwo – zalety i wady”. TTS 5–6/2020 <https://journals.agh.edu.pl/er/article/view/566619>.
- Informacje sygnałne GUS. 19 maja 2023. „Zużycie energii w gospodarstwach domowych w 2021 roku”.
- Iwińska Katarzyna, Kamil Kulesza, Michał Wróblewski, Joanna Grudowska. Warszawa, Czerwiec 2023. „Bezpieczeństwo w technologiach wodorowych IV – Inżynieria Bezpieczeństwa technologii Wodorowych – Bezpieczeństwo w obszarze Magazynowania wodoru”. Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Organizacji i Zarządzania w Przemysle Orgmasz.
- Katalog Hexagon Agility Karta produktu – dane techniczne: cysterna do przewozu CNG, https://s3.eu-central-1.amazonaws.com/hexagonassets/Agility_MobilePipeline_TITAN.pdf.
- Katalog Hexagon Purus Karta produktu – dane techniczne: kontenera do przewozu sprężonego wodoru, <https://hexagonpurus.com/downloads>.
- Katalog naczepo-cystern BC-LDS Sp. z o. o. Karta produktu – dane techniczne: cysterny do przewozu LPG. <https://bcllds.pl/oferta/cysterny-gazowe/>.
- Katalog naczepo-cystern TIMEX S.A. Karta produktu – dane techniczne: cysterny do przewozu paliw płynnych o pojemności 39 m³. <https://timex-trailers.pl/produkty/kaessbohrer/cysterny/cysterna-do-przewozu-paliw-plynych/stb-395-cysterna-5-komorowa-pojemnosci-39-m3/#dane-techniczne>.
- Kotowicz Janusz, Kamila Szykowska. 2021. „Wodór i współczesne metody jego produkcji i wykorzystania”. *Rynek Energii* Nr 2(153).
- Lima Aniela, Radosław Szczerbowski. 2019. „Technologia Power to Gas w energetyce”. *Energia Gigawat* nr 4(218) .
- Nowicki Emil. 2021. „Transformacja energetyki a bezpieczeństwo energetyczne Polsk”. *Nowa energia*. nr 3(79).
- Pawelko Piotr. 2018. „Napędy i sterowanie, hydrauliczne i pneumatyczne – materiały pomocnicze dla specjalności Mechatronika/Energetyka”. Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny. Skrypt.
- PN-EN ISO 6976:2016.
- Raport GUS „Energia”. Warszawa.
- Rosłonek Grzegorz. 2019. „Wodór – teraźniejszość i Przyszłość”. *Przemysł Gazowniczy* nr 4(64): 25-27.
- Rosłonek Grzegorz. Styczeń 2024. „Cztery dekady rozwoju i zastosowania przepływomierzy coriolisa jako urządzeń pomiarowych w gazownictwie. Możliwości zastosowania przepływomierzy masowych Coriolisa do pomiarów LNG”. *Gaz Woda i Technika Sanitarna* (1):2-8.
- Rzeszotarska Magdalena. Warszawa – Bemowo – 2021 „Mechanosynteza, struktura i właściwości kompleksowego wodoru typu Mg2Fe(X)H6 wytwarzane z prozkowych substratów MgH2 i 316L”. Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego Wydział Nowych Technologii i chemii. Rozprawa doktorska.
- Siekierski Maciej, Karolina Majewska, Maja Mroczkowska-Szrzeniec. 2023. „Metody efektywnego i bezpiecznego magazynowania wodoru jako warunek powszechnego jego wykorzystania w transporcie i energetyce”. *Nafta-Gaz* 2023, nr 2, s. 114–130, DOI: 10.18668/NG.2023.02.06.
- Witkowski Andrzej, Andrzej Rusin, Mirosław Majkut, Katarzyna Stołęcka – Antczak. 2017. „Comprehensive analysis of hydrogen compression and pipeline transportation from thermodynamics and safety aspects”. *Energy Tom* 141. 15 grudnia 2017: 2508-2518..