ANNA MARZEC)*

Energetyka wodorowa – co to oznacza dla roli węgla?

Hydrogen or rather coal derived energy supply in near future?

Wprowadzenie

Ostrzeżenia płynące od wielu lat ze środowisk klimatologów na temat postępującego ocieplenia klimatu i jego groźnych skutków m.in., w postaci coraz intensywniejszych ekstremalnych zjawisk pogodowych, wskazują na pilną konieczność wprowadzenia zmian w systemach produkcji i użytkowania energii w celu ograniczenia emisji gazów cieplarnianych, w tym przede wszystkim – emisji dwutlenku węgla. Narazie niewiele wskazuje na korzystne zmiany. Według raportu ONZ (opublikowanego 30 listopada 2006 r.) emisja wszystkich gazów cieplarnianych w krajach uprzemysłowionych wzrosła o 2,3 % w okresie 2000-2004. Przemysł wraz z sektorem transportu samochodowego w Europie Centralnej i Wschodniej zajmuje niechlubne pierwsze miejsce – tu emisja wzrosła w wymienionym okresie o 4,1 %. W roku 2004 światowa emisja dwutlenku węgla ze spalania wszystkich paliw kopalnych wyniosła 27 miliardów ton.

W niektórych kręgach forsowana jest opinia, iż radykalnym środkiem poprawy tej sytuacji, a także rozwiązaniem zapewniającym uniezależnienie od dostaw ropy i gazu, jest wodór. Umożliwi on bowiem produkcję „czystej" energii cieplnej i elektrycznej oraz zapewni napęd dla sektora transportu samochodowego, bez jakiejkolwiek emisji gazów cieplarnianych. Warto zatem przyjrzeć się bliżej tej wodorowej perspektywie.

Produkcja wodoru z surowców kopalnych

Wodór może być produkowany z gazu ziemnego, frakcji ropy naftowej lub z węgla. Jednak w Polsce wodór powinien być produkowany z węgla, z oczywistych powodów braku własnych, znaczących zasobów ropy i gazu ziemnego. Technologie takiej produkcji (reforming parą wodną, półspalanie, autotermiczny reforming, zgazowanie) są w mniejszym lub większym stopniu znane, ale w każdym wypadku nie wymagają opracowań od podstaw. Pojawia się tu problem innego rodzaju. Wszystkie te technologie wymagają stosowania wysokich temperatur. Jeśli ciepło potrzebne do przeprowadzenia tych reakcji będzie pochodziło ze spalania surowców kopalnych, to taka produkcja wodoru będzie nieodłącznie związana z emisją dwutlenku węgla. Drugim źródłem CO_2 jest reakcja jego powstawania nieodłącznie związana z reakcjami generującymi wodór.

Wniosek: procesy produkcji wodoru z paliw kopalnych, a w szczególności z węgla, muszą być skojarzone z procesami wydzielania dwutlenku węgla w czasie produkcji wodoru oraz deponowaniem (tzw. sekwestracją) dwutlenku w sposób izolujący go od atmosfery. Jeśli ten warunek nie zostanie spełniony, nie może być mowy o tym, iż stosowanie wodoru jako paliwa przyczyni się do obniżenia emisji dwutlenku węgla do atmosfery.

Sekwestracja dwutlenku węgla

Realizacja sekwestracji wiąże się z koniecznością znalezienia odpowiednio szczelnych złóż podziemnych, które uniemożliwiłyby jakikolwiek wyciek dwutlenku węgla do atmosfery i odcięłyby go od kontaktu ze złożami podziemnych wód. Takie rozwiązanie wymaga czasu i odpowiednich nakładów finansowych.

Jeśli sekwestracja będzie już możliwa do realizacji, to pojawi się następna wątpliwość. Przecież produkcję energii elektrycznej z węgla lub gazu ziemnego można także skojarzyć z sekwestracją dwutlenku węgla i otrzymać w ten sposób całkowicie czystą energię elektryczną. Jeśli tak, to każde przedsięwzięcie inwestycyjne zmierzające do produkcji wodoru należy porównać pod względem dojrzałości technologicznej, efektywności energetycznej i kosztów, z budową lub modernizacją elektrowni czy elektrociepłowni, które dostarczałyby tę samą ilość energii użytecznej. Istotne także jest to, iż zakres wykorzystywania energii elektrycznej i wodoru jest podobny. Może ona być stosowana w ciepłownictwie oraz w sektorze transportu samochodowego.

Wodór produkowany z wody

Woda jest bardzo trwałym związkiem i jej rozkład wymaga dużej ilości energii. Teoretycznie wodór mógłby być produkowany z wody na drodze elektrolizy. Takie rozwiązanie nie jest jednak ani realne, ani pożądane. Warto w tym miejscu przytoczyć następujące dane. Wyprodukowanie takiej ilości wodoru, aby można było zaopatrzyć w niego cały transport samochodowy w USA, wymagałoby tam podwojenia obecnej produkcji energii elektrycznej. Rezultatem takiego rozwiązania byłby nie tylko wodór, ale także wielomiliardowe nakłady na budowę nowych elektrowni, podwojenie dotychczasowej emisji dwutlenku węgla z elektrowni i problemy z poborem

*) **Autor do korespondencji:**
Prof. dr hab. inż. Anna Marzec – e-mail:marzeca@neostrada.pl www.amarzec.republika.pl

dużych ilości wody, której mogłoby nie starczyć dla jej dotychczasowych użytkowników.

Argument, że energię elektryczną, potrzebną do elektrolizy wody, można produkować z odnawialnych źródeł energii, również nie wydaje się istotny. Jeśli bowiem byłaby dostępna prawdziwie czysta energia elektryczna z odnawialnych surowców, to znów pojawia się pytanie – po co produkować wodór, skoro mielibyśmy do dyspozycji czystą energię elektryczną?

Obiecującym rozwiązaniem mogłaby być produkcja wodoru z wody przy użyciu energii jądrowej. Jednak na nowe, bezpieczne technologie produkcji energii jądrowej w skali przemysłowej trzeba jednak poczekać kilkadziesiąt lat.

Wodór z biomasy

Tę koncepcję, podobnie jak produkcję energii elektrycznej lub ciepła z biomasy, charakteryzuje zasadnicze ograniczenie. Biomasa nie może być głównym źródłem energii, ponieważ może być ona pozyskiwana jedynie z ograniczonej powierzchni, która przede wszystkim musi być wykorzystywana do produkcji żywności dla ludzi i hodowli zwierząt. Stąd też przewidywany udział biomasy w produkcji energii wynosi zaledwie kilka procent potrzebnej energii.

Transport wodoru od producenta do użytkownika

Dystrybucja wodoru wymaga odpowiedniej infrastruktury, obejmującej rurociągi, samochody ciężarowe przystosowane do przewozu dużych ilości wodoru, instalacje do magazynowania wodoru na stacjach dostarczających ten gaz do detalicznych odbiorców, kompresory i dystrybutory. Tu należy brać pod uwagę szczególne właściwości wodoru. Jedna z nich wynika z faktu, iż molekuły wodoru (nieporównywalnie mniejsze od molekuł jakichkolwiek innych substancji występujących na ziemi) mają zdolność do przenikania przez materiały konstrukcyjne. Następna, związana jest z jego dużą skłonnością do wybuchu (obszar wybuchowości wodoru to od 4 do 75 % obj. w mieszaninie z powietrzem, a np. dla metanu tylko 5÷15 % obj.). Nie można zatem żywić nadziei, że do dystrybucji wodoru da się wykorzystać urządzenia stosowane do dystrybucji gazu ziemnego. W istocie, każdy element sieci dystrybucji wodoru wymaga nowych technicznych rozwiązań.

Pewną nadzieję na wykorzystanie infrastruktury przesyłu gazu ziemnego można wiązać z ostatnim doniesieniem, według którego dodatek wodoru do gazu w ilości nieprzekraczającej 17 % obj. nie powoduje negatywnych skutków. A zatem, wodór mógłby znaleźć niszowe zastosowanie jako komponent gazu ziemnego, zmniejszający ewentualny deficyt tego gazu.

Dobrze znany jest fakt, iż w sieci dystrybucji gazu ziemnego występują wycieki gazu do atmosfery z wielu różnych przyczyn. Niektóre źródła podają, że wycieki te sięgają 10 % przesyłanego gazu ziemnego. Według innych, ocena ta jest zawyżona. Ale w odniesieniu do wodoru, 10 %-owy wyciek do atmosfery na pewno nie byłby oceną zawyżoną. Uwolniony wodór szybko przenikałby do górnych warstw atmosfery (jest to bowiem najlżejsza substancja w porównaniu z innymi składnikami atmosfery) i tam wchodził w reakcję z ozonem, w wyniku czego warstwa ozonowa, stanowiąca naturalną ochronę ziemi przed zbyt intensywnym promieniowaniem ultrafioletowym, ulegałaby zniszczeniu.

Tak czy inaczej, przesyłanie wodoru od producenta do użytkownika to nowe wyzwanie techniczne. Porównanie z realizowanym od wielu lat przesyłaniem energii elektrycznej nie wymaga dalszych komentarzy.

Wodór w sektorze transportu samochodowego

Podstawową trudnością w zastosowaniu wodoru jako napędu w samochodach jest sposób zaopatrzenia pojazdów w to paliwo. Samochód osobowy powinien mieć możliwość jednorazowego zatankowania wodoru w ilości kilku kilogramów. Taka ilość wodoru umożliwiłaby przebieg ok. 500 km czyli podobny do tego, jaki ma miejsce po jednorazowym tankowaniu benzyny czy oleju napędowego.

Pozornie najprostsze rozwiązanie to zaopatrzenie samochodu w butle zawierające sprężony gazowy wodór. Duże butle, w których wodór jest obecnie dostarczany do użytkowników (zaopatrzenie laboratoriów, spawaczy itp.) zawierają 40 l wodoru pod ciśnieniem ok. 15 MPa, czyli około 0,6 kilograma wodoru. A zatem, aby zaopatrzyć samochód w 3 kg wodoru, należałoby zamontować w nim pięć takich butli. A ciężar własny każdej z tych butli to kilkadziesiąt kilogramów. Może zatem należałoby zastosować butle zawierające wodór pod kilkakrotnie wyższym ciśnieniem, np. około 60 MPa? Tu pojawiają się następne trudności. Energia potrzebna do tak znacznego sprężenia wodoru u producenta butli wodorowych, wynosiłaby około połowy tej energii, jaką zawierałby transportowany w ten sposób wodór. Efektywność energetyczna użytkowania wodoru pod tak wysokim ciśnieniem byłaby zatem bardzo niska. Ponadto trzeba opracować nowe materiały konstrukcyjne i sposób produkcji pojemników dla wodoru pod tak znacznym ciśnieniem. W USA doświadczalną produkcją i testowaniem pojemników na ciśnienie wodoru, wynoszące ok. 34 MPa (5000 psi) i ok. 68 MPa (10000 psi) zajmuje się głównie firma Quantum Technologies. Materiał konstrukcyjny stanowi kilka warstw różnych kompozytów polimerowych; dzięki temu zbiorniki są stosunkowo lekkie. Ewentualne powodzenie w tym zakresie nie eliminuje jednak w żadnej mierze konieczności zużycia dużej ilości energii na kompresję wodoru do tak wysokich ciśnień.

Podobnie problematycznie przedstawia się transport wodoru w samochodach w postaci ciekłej. Tu także zużycie energii potrzebne do skroplenia wodoru byłoby bardzo duże, bowiem wymagałoby oziębienia gazu do temperatury niższej od 33 K (czyli od –240°C). A co z utrzymaniem wodoru w samochodzie w ciekłej postaci, to znaczy w temperaturze niższej od –240°C? Jeśli wzrosłaby temperatura pojemnika zawierającego ciekły wodór, eksplozja wywołana gwałtownym wzrostem ciśnienia (powstającej fazy parowej) byłaby nieuchronna. To niebezpieczeństwo może być wyeliminowane, jeśli zastosuje się system chłodzenia zbiornika ciekłego wodoru za pomocą ciekłego azotu. Chłodzenie byłoby na pewno skuteczne. Zasada chłodzenia za pomocą ciekłego azotu polega na tym, iż ciekły azot umieszczony w zbiorniku (z otwartym wentylem) mógłby odparowywać do atmosfery i pobierać potrzebne do parowania ciepło z otoczenia zbiornika ciekłego wodoru. Wyciek azotu do atmosfery nie stanowi żadnego zagrożenia dla bezpieczeństwa pojazdu (azot nie

pali się i nie jest wybuchowy) ani też dla atmosfery (azot to naturalny główny składnik atmosfery).

Trudno jednak odnosić się optymistycznie do tej perspektywy zasilania samochodów w ciekły wodór, bowiem łączy się ona z dodatkowym wyposażeniem samochodu w butlę azotową oraz z koniecznością tankowania nie tylko ciekłego wodoru, ale także ciekłego azotu.

Nad nieco inną koncepcją zaopatrzenia samochodów w ciekły wodór (LH2) lub wysoko sprężony gazowy wodór (GH2) pracuje obecnie jeden z instytutów w USA (Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA). Z uwagi na zamierzone zamienne stosowanie zarówno LH2 jak i GH2, zbiorniki mają być wytrzymałe na ciśnienie ok. 70 MPa i na niską temperaturę (ok. –252°C). Zbiornik ma być umieszczony w kolejnym, tym razem próżniowym zbiorniku, w celu zapobiegania transferowi ciepła z otoczenia. Ponieważ jednak w miarę upływu czasu, pobór ciepła z otoczenia doprowadzi do pewnego wzrostu temperatury wodoru, konieczne jest zastosowanie wentyla umożliwiającego wypływ gazu ze zbiornika, nawet w tym przypadku, kiedy pojazd nie jest w ruchu.

Innym rozwiązaniem problemu magazynowania wodoru w pojazdach samochodowych są nowe materiały (specjalnie aktywowany węgiel, wodorki metali), które są zdolne do pochłaniania wodoru i do jego wydzielania w wyższej temperaturze w porównaniu z temperaturą, w której materiały te zaadsorbowały wodór. Materiały te byłyby instalowane w samochodach w pojemnikach, pod tylko niewielkim ciśnieniem. Takie „baki" na wodór byłyby niemal całkowicie bezpieczne, podobnie jak bak benzynowy. Problem jednakże w tym, iż masa pochłoniętego wodoru w stosunku do masy pochłaniającego materiału jest doprawdy niewielka a postęp w tej dziedzinie, mimo intensywnych badań prowadzonych od kilkunastu lat, jest bardzo umiarkowany.

Trafną ilustracją wielce umiarkowanych nadziei na postęp w dziedzinie magazynowania wodoru w samochodach są cele sformułowane przez Ministerstwo Energii (Department of Energy) rządu federalnego USA. Wyrażają się one w ilości wodoru, możliwej do zatankowania w samochodzie, w procentach masowych ciężaru urządzenia magazynującego wodór. Założone cele to:

- 4,5 % mas. wodoru w 2007 r.
- 6,0 % mas. wodoru w 2010 r.
- 9,0 % mas. wodoru w 2015 r.

Jest przy tym wysoce prawdopodobne, że cele te będą mogły być zrealizowane jedynie wówczas, gdy w samochodach zastosowany zostanie system chłodzenia pojemników zawierających wodór w takiej lub innej postaci, za pomocą ciekłego azotu. A to stanowi dodatkowe znaczne obciążenie samochodu i konieczność tankowania dwu mediów – wodoru i ciekłego azotu.

Wszystkie te okoliczności wywołują wątpliwości czy aby nie należy traktować napędu elektrycznego dla samochodów jako priorytet w porównaniu z napędem wodorowym. Napęd elektryczny stosowany już jest z powodzeniem w niektórych typach samochodów (np., Toyota Prius). Dalszy postęp w tej dziedzinie, polegający na możliwości ładowania samochodowych baterii w czasie garażowania samochodu w porze nocnej, także nie wiąże się z trudnościami technologicznymi.

Wnioski

Nie znajduje uzasadnienia optymizm, dotyczący perspektyw generalnego rozwiązania problemów ochrony klimatu przed emisją gazów cieplarnianych oraz coraz trudniejszej dostępności do ropy naftowej i gazu, poprzez produkcję paliwa wodorowego. Niestety, nie jest to uniwersalny lek na te dolegliwości. Co więcej, takiego uniwersalnego leku w ogóle nie ma. Trzeba szukać cząstkowych rozwiązań. Do nich należy wzrost efektywności energetycznej dotychczasowych procesów produkcji energii i użytkowania tej energii (dlaczego np. postęp w ocieplaniu budynków jest tak powolny, mimo iż prowadzi on do 30÷50 %-owego obniżenia zużycia energii?). Do nich należy rozwój produkcji energii z odnawialnych surowców energetycznych (geotermika, biomasa, słońce, wiatr, elektrownie wodne) aż do osiągnięcia potencjalnych możliwości, charakteryzujących dostępność tych surowców na terenie kraju. Do nich też należy sensowna dbałość o import ropy i gazu ziemnego.

Dalsze cząstkowe rozwiązania to wzrost produkcji energii elektrycznej z węgla, mający między innymi na celu wprowadzenie do użytku samochodów hybrydowych lub elektrycznych oraz eliminację paliw kopalnych (węgiel, olej opałowy) i towarzyszącą temu rozproszoną, niemożliwą do zwalczenia emisję dwutlenku węgla z ogrzewnictwa w budownictwie rozproszonym.

To także, a może zwłaszcza, szybkie wdrożenie znanych na świecie technologii otrzymywania gazu i paliw ciekłych z węgla. Wszystkie te rozwiązania charakteryzuje nieporównanie większa dojrzałość technologiczna od „czystej" technologii produkcji wodoru, a przede wszystkim od technologii jego dystrybucji i wykorzystania. Przewiduje się, że osiągnięcie tej dojrzałości dla wodoru zajmie 25 do 35 lat. W tym okresie można liczyć tylko na węgiel jako główne źródło energii.

Literatura

Opracowano na podstawie literatury cytowanej we wcześniejszych publikacjach autorki (ich spis podano na stronie www.amarzec.republika.pl) *oraz dalszych pozycji literaturowych:*

S.M. Aceves et al., Vehicular storage of hydrogen in insulated pressure vessels. Intern. Journal of Hydrogen Energy, 2006, t. 31, s. 2274-2283.

D.W. Haeseldonks et al., The use of the natural-gas pipeline infrastructure for hydrogen transport. Intern. Journal of Hydrogen Energy, 2007 (article in press).

Li Zhou., Progress and problems in hydrogen storage methods. Renewable and Sustainable Reviews, 2005, t. 9, s. 395-408.

US Dept of Energy. Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Program. Status of Hydrogen Storage Technologies
http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/storage/hydrogen_storage.html

V.P. Utgikar et al., Safety of compressed hydrogen fuel tanks. Technology in Society, 2005, t. 27, s. 315-320.