

Badania możliwości zmian składu mieszanek metanowo-wodorowych na membranach

Research on the possibility of changing the composition of methane-hydrogen blends on membranes

Andrzej Janocha, Piotr Jakubowicz

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: W związku z poszukiwaniem źródeł energii alternatywnych do gazu ziemnego można przyjąć, że w najbliższych latach pojawią się odcinki gazociągów, którymi transportowana będzie mieszanka gazu ziemnego z wodorem (HCNG). Gaz ten lokalnie może być częściowo stosowany jako paliwo do silników spalinowych, np. w pojazdach samochodowych. Wykorzystanie paliw alternatywnych, w tym także wodoru i jego mieszanin z gazem ziemnym, jest widocznym trendem szczególnie w zasilaniu pojazdów komunikacji miejskiej. W artykule opisano paliwo CNG (sprężony gaz ziemny) stosowane już w pojazdach spalinowych w Polsce oraz dokonano analizy opisu nowego paliwa gazowego HCNG (sprężone mieszanki wodoru i gazu ziemnego). Paliwo HCNG całkowicie eliminuje z produktów spalania sadze i cząstki stałe oraz obniża emisję CO₂, CO i NO_x. W artykule podjęto badania zmian zawartości wodoru w mieszanekach z metanem z wykorzystaniem technologii membranowej. Omówiono właściwości membran do separacji gazów i opracowano projekt instalacji. Utworzono stanowisko badawcze membranowego rozdziału mieszanki wodoru z gazem ziemnym, na którym przeprowadzono badania zależności przepływu mieszaniny 15% wodoru w metanie przez moduł z kapilarnymi membranami poliimidowymi. Gaz wpływał do modułu do przestrzeni międzykapilarnej w układzie przeciwprądowym. Przeprowadzono serie testów separacji wodoru i metanu w funkcji ciśnień i wydajności uzyskiwanych produktów. Dla ciśnienia wlotowego 60 bar i ciśnienia permeatu na poziomie 1 bar i 4 bar określano składy permeatu i retentatu. Uzyskano bardzo wyraźny rozdział składników gazowych (H₂ i CH₄) w poszczególnych produktach. Zawartość wodoru z 15% w gazie wlotowym – wzrasta kilkukrotnie w strumieniu permeatu i obniża się w wysokociśnieniowym strumieniu retentatu. Wyniki niniejszej pracy mogą służyć do opracowania wytycznych do projektu uniwersalnego punktu (stacji) tankowania HCNG (lub innych zastosowań) o dowolnie wymaganej zawartości H₂ w metanie w zakresie od 2% do 70% wodoru.

Słowa kluczowe: moduły membranowe, poliimidy, CNG, HCNG – mieszanka wodoru z metanem, gaz ziemny.

ABSTRACT: It can be assumed that in the coming years there will be sections of gas pipelines where blends of natural gas and hydrogen (HCNG) will be transported. This gas can be partially used locally as a fuel for internal combustion engines, e.g. motor vehicles. The use of alternative drives, including those powered by hydrogen and its blends with natural gas, is a visible trend, especially in public transport vehicles. The already used CNG fuel (compressed natural gas) in vehicles in Poland was described and the description of the new HCNG gas fuel (compressed hydrogen and natural gas mixtures – hytane) was analyzed. The fuel (HCNG) completely eliminates soot and particulate matter from combustion products and lowers CO₂, CO and NO_x emissions. In this article, studies of changes in the content with the use of membrane technology were made. Gas separation membranes are discussed and a plant design has been developed. A test stand for the membrane separation of a mixture of hydrogen and natural gas was established. The research was carried out on the dependence of the flow of a mixture of 15% hydrogen in methane through a module with capillary polyimide membranes. The gas flowed into the module into the intercapillary space in a countercurrent system. A series of tests on the separation of hydrogen and methane as a function of pressure and efficiency of the obtained products was carried out. The permeate and retentate compositions were determined for an inlet pressure of 60 bar and a permeate pressure of 4 bar and 1 bar. A very clear separation of gaseous components (H₂ and CH₄) in individual products was obtained. The hydrogen content of 15% in the feed gas increases several fold in the permeate stream and decreases in the high pressure retentate stream. The results of this work can be used to develop guidelines for the design of a universal HCNG refuelling point (station) (or other applications) with any required H₂ content in methane in the range from 2 to 70% hydrogen.

Key words: membrane modules, polyimides, CNG, HCNG - hydrogen blended in methane, natural gas.

Autor do korespondencji: A. Janocha, e-mail: andrzej.janocha@inig.pl

Artykuł nadesłano do Redakcji: 13.01.2023 r. Zatwierdzono do druku: 12.12.2023 r.

Wprowadzenie

Rozwój rynku wodoru jest jednym z koniecznych strategicznych kierunków dekarbonizacji gospodarki, który to proces trwał będzie jeszcze przez wiele lat (PSW, 2021). W tym czasie stosowane będą różne pomostowe i przejściowe rozwiązania, między innymi wzrost udziału paliw alternatywnych, w których składzie stosunek wodoru do węgla będzie coraz większy (Wojtowicz, 2019). Należą do nich paliwa gazowe takie jak np. sprężone mieszanki metanu z wodorem (HCNG), które można stosować do zasilania silników spalinowych w transporcie.

Zanim docelowo powstanie sieć lokalnych wytwórców wodoru (w pobliżu ich użytkowników) czy rurociągów wodorowych, w okresie przejściowym jednym z rozwiązań transportu wodoru lub jego mieszanek jest wykorzystanie fragmentów istniejącej sieci gazu ziemnego spełniających odpowiednie warunki techniczne.

W raporcie instytutu Fraunhofer IEE (Bard et al., 2022) przedstawiono między innymi analizę wykorzystania wodoru poprzez dodawanie go do gazu ziemnego dla różnych celów. Stwierdzono w nim, że do 2030 r. realnie można będzie zastąpić nieco ponad 10% gazu ziemnego wodorem, przy intensywnym wdrażaniu europejskich celów klimatycznych (zwłaszcza związanych z produkcją wodoru zielonego). Należy zatem rozważyć i ustalić priorytety, gdzie i do których konsumentów będzie w pierwszej kolejności kierowany wytworzony wodór, mając na uwadze względy ekonomiczne, klimatyczne i perspektywę zwiększania produkcji H_2 po 2030 r. Przykładowo, powszechne bezkrytyczne dodawanie (mieszanie) zielonego wodoru do gazu ziemnego w sieciach grozi „marnowaniem” wodoru – poprzez zastosowanie go w sektorach takich jak ogrzewanie, gdzie w perspektywie lat docelowo dostępne będą bardziej wydajne i opłacalne źródła energii w tym zakresie. Ze względów środowiskowych celowe jednak wydaje się wykorzystanie mieszanek gazu ziemnego z wodorem (Fraile, 2015; Piskowska-Wasiak, 2017) w aglomeracjach miejskich w transporcie komunalnym (autobusy, śmieciarki).

Podczas realizacji prac opisanych w niniejszym artykule założono, że w najbliższych latach pojawią się odcinki gazociągów, którymi transportowana będzie mieszanka gazu ziemnego z wodorem (HCNG) wykorzystywana bezpośrednio lub po niewielkiej obróbce jako paliwo do różnych rodzajów pojazdów i urządzeń wyposażonych w silniki spalinowe, podobnie jak CNG (ang. *compressed natural gas* – sprężony gaz ziemny).

Istnieje zainteresowanie zasilaniem silników pojazdów samochodowych paliwami gazowymi (Gis et al., 2011; Garbala et al., 2016, 2018). Koszty eksploatacji takich pojazdów są znacząco niższe w porównaniu z użyciem paliw tradycyjnych (Burdzik et al., 2017). Ważnym tanim paliwem gazowym jest CNG, które ciągle jest mało popularne w Polsce.

Światowym liderem w liczbie samochodów napędzanych CNG jest Argentyna (Gifford, 2011; Chłopek, 2012). W Polsce w 2018 r. było około 2000 pojazdów, w tym 442 autobusy, z zasilaniem CNG. Największy tabor autobusów CNG (2018 r.) posiadały Tychy (74) i Rzeszów (69).

Wyniki eksperymentów zasilania silników mieszaniną 5%, 10% i 15% H_2 w HCNG przedstawili Pandey et al. (2022). Odnotowali spadek zawartości CO w spalinach o 14,3%, 28,5% i 71,4% w stosunku do spalin z czystego CNG oraz podobnie zmniejszenie zawartości CO_2 – o 17,2%, 24,1% i 51,7%. Badania wpływu dodatku H_2 do CNG na pracę silnika (stopień sprężania, kąt wyprzedzenia zapłonu, moc i charakterystykę spalania) oraz redukcję emisji zanieczyszczeń (HC, CO, NO_x i CO_2) były prowadzone przez wielu autorów (Ma et al., 2012; Lim et al., 2013; Baratta et al., 2014; Tangöz et al., 2017; Kumar et al., 2022; Zhunqing et al., 2022). Wzbogacanie gazu ziemnego w wodór może być potencjalną alternatywą dla ciekłych paliw węglowodorowych do zastosowań w silnikach spalinowych. Tego typu mieszanki wykorzystują unikalne właściwości spalania wodoru i jednocześnie zmniejszają zapotrzebowanie na czysty wodór. Wielu badaczy (Nanthagopal et al., 2011; Ruze et al., 2021) pracowało nad tym zagadnieniem przez wiele lat, a obecnie prace koncentrują się na tym, jak maksymalnie (Karner i Francfort, 2003; Saaidia et al., 2020; Zareei et al., 2022) i ekonomicznie (Navarro et al., 2013) wykorzystać ten rodzaj paliwa. Z badań tych wynika, po drobiazgowych obliczeniach kosztowych, że zastosowanie HCNG jest korzystniejszą opcją w porównaniu z użyciem innych paliw.

Yadav i Sircar (2017) opisali w swoim artykule nowe trendy polegające na wykorzystaniu LCNG i HCNG, które są postrzegane jako futurystyczne paliwo świata, w sektorze gazu ziemnego. W przypadku LCNG skroplony gaz ziemny jest sprężany do znacznego ciśnienia i zamieniany na skompresowany gaz ziemny.

W innym artykule (Villante et al., 2013) przedstawiono wyniki testów, w których po przeprowadzeniu kalibracji silnik uzyskał formalną homologację UE i od początku 2013 r. jeździ zamontowany w autobusie miejskim. Podobnie w pracy Eichlsedera et al. (2009) dwupaliwowy pojazd benzynowo-gazowy został przystosowany do pracy z benzyną, gazem ziemnym, wodorem oraz dowolnymi mieszankami H_2 -NG. Po wymianie kolektora ssącego i regulacji ECU (elektroniczny moduł sterujący silnika) oraz zamontowaniu zbiorników na wodór o ciśnieniu 350 bar wszystkie wymogi homologacji drogowej zostały spełnione. W badaniach Klella et al. (2010, 2012) stwierdzono na podstawie wyników prób, że można mówić o niezawodnym działaniu układu paliwowego i silników przy zawartości H_2 w CNG do 30%. Podobnie w pracy Xu et al. (2010) opisany został eksperyment, w którym silnik zasilany był różnymi proporcjami wodoru i CNG (100:0; 80:20; 50:50

i 0 : 100) i badany pod kątem sprawności silnika. Badania wykazały, że mieszanki HCNG z 20–30-proc. objętością wodoru są optymalne dla wydajności pojazdu i redukcji emisji zanieczyszczeń (Del Toro et al., 2005). Wyniki tych badań następnie wykorzystano w projektach pilotażowych w dwóch stanach w Indiach w 2009 r. (Pal, 2009), gdzie pojazdy zasilane 20% H₂ używane są do dziś. Te sukcesy zaowocowały nowymi wdrożeniami (Economic Times, 2020) – we wrześniu 2020 r. nastąpiła inauguracja instalacji produkującej HCNG (sprężony gaz ziemny wzbogacony w wodór) i stacji dystrybucji HCNG (18% H₂) w zajezdni Rajghat w New Delhi. Rozpoczęto tam test tego paliwa we flocie 50 autobusów klastrowych zgodnych z normą BS-IV.

Nadal trwają badania i prace rozwojowe, testy oraz prace legislacyjne mające na celu większe upowszechnienie HCNG (niekiedy zwanego hytanem). Rosnąca liczba stacji CNG wskazuje, że ten kierunek zasilania pojazdów (głównie autobusów miejskich) rozwija się dynamicznie. Kwestia szerszego wprowadzania wodoru do istniejących lub nowo budowanych sieci gazowniczych (na odcinkach z planowanymi stacjami tankowania HCNG) jest na świecie poważnie rozważana zarówno na poziomie lokalnym, krajowym, jak i międzynarodowym (USA–Holandia, Europa–USA). Obecnie prace prowadzone są głównie na poziomie programów demonstracyjnych (Kouchachyili i Entchey, 2018; HyGrid, 2021).

W raporcie Perujo et al. (2013) przedstawiono wyniki eksperymentalnej kampanii przeprowadzonej przez JRC (Joint Research Centre) polegającej na wsparciu działań legislacyjnych na rzecz opracowania rozporządzeń: (WE) nr 79/2009 i UE 2019/2144 Parlamentu Europejskiego w sprawie homologacji pojazdów silnikowych z napędem gazowym zawierającym wodór. Raport służył jako naukowa podstawa techniczna do badania proponowanych metod homologacji w odniesieniu do pojazdów wykorzystujących zmienną mieszaninę H₂ i CNG.

Tolerancja ustawowa na zawartość H₂ w sieci gazu ziemnego jest w Europie niejednorodna (van Essen et al., 2021), w zakresie od 0,1% (Belgia) do 10% (Niemcy), odrębnie dla każdego przypadku, w zależności od specyfiki sieci. Ponadto raport van Essena et al. (2021) porównuje zastosowanie czystego H₂ w ogniwach paliwowych pojazdów elektrycznych (FCEV) z użyciem go w silnikach spalinowych (ICE). Z jednej strony pojazdy FCEV wykazują lepszą oszczędność paliwa i brak emisji zanieczyszczeń w porównaniu z ICE. Z drugiej strony natomiast wymagają bardzo wysokiej czystości H₂, co wpływa na wzrost kosztów paliwa na stacjach detalicznych i na wyższe całkowite koszty eksploatacyjne.

HCNG jest już stosowane lokalnie w szeregu państw (Niemcy, Szwecja, Norwegia, Francja, Włochy, Wielka Brytania, USA, Indie, Argentyna, Brazylia) zarówno ze względu na niższą emisję spalin, jak też na dostęp do wodoru

w wyniku zrealizowanych różnych programów związanych z jego produkcją. Także nasz kraj jest jednym z kluczowych producentów wodoru na świecie (około 1 mln ton/rok), a może go produkować jeszcze więcej, w tym z wykorzystaniem OZE. Prawdopodobnie również w Polsce w najbliższych latach pojawią się oferty HCNG, zwłaszcza w tych miastach, gdzie już istnieją stacje CNG. Rozwijająca się, ale zróżnicowana technicznie flota pojazdów zasilanych CNG może przy przechodzeniu na zasilanie HCNG wymagać (dopuszczać) różnego stężenia H₂ w składzie mieszanki, co przedstawiono poniżej na podstawie realizowanych kilku wybranych projektów demonstracyjnych w Europie i USA:

- Francja – Dunkierka: 6% do 20% H₂, zasilanie autobusów i 200 domów mieszkalnych;
- Włochy – Snam: 5% H₂ do sieci przesyłowej gazu, Contursi Terme i Treviso: 10% H₂;
- Wielka Brytania – projekt H21 Leeds CityGate – przekształcenie istniejącej sieci NG na 100% H₂;
- Wielka Brytania – HyDeploy na Uniwersytecie Keele: do 20% mieszanki H₂;
- Niemcy: próba dostarczania 10% mieszanki H₂ z CNG do 170 klientów;
- Holandia – E.ON Technologies w Amerland: do 20% mieszanki H₂;
- USA – SoCalGas i UC Irvine: mieszanie do 20% H₂ wytworzonego z nadwyżki energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych do rurociągu (Kouchachyili i Entchey, 2018).

Wprowadzenie wodoru do CNG jest możliwe, jeśli w samochodach stosowane są butle kompozytowe (Farese et al., 2010), które od kilku lat są już standardem wyposażenia pojazdów zasilanych CNG, głównie ze względu na ich znacznie niższą masę oraz niższe niż przed laty ceny. Układ instalacyjny w samochodach zasilanych CNG w dotychczasowych wersjach wyprodukowanych w latach 2008–2014 pozwala na obecność wodoru w zróżnicowanym zakresie stężeń (od 4% do nawet 30% H₂) w zależności od firmy. Ponieważ żywotność pojazdów zasilanych CNG przekracza niekiedy 30 lat, to będą one funkcjonowały na rynku jeszcze co najmniej kilkanaście lat. Wychodząc naprzeciw zróżnicowanym wymaganiom dotychczasowych użytkowników CNG w możliwościach (technicznych) przejścia na HCNG o różnych zawartościach wodoru, w niniejszym artykule podjęto próbę dopasowania stężenia H₂ do ich potrzeb z wykorzystaniem technologii membranowej.

Membrany do separacji gazów

Mechanizm separacji membranowej składników gazowych przez przegrody nieporowate polega na tym, że molekuly gazu sorbowane są na jednej powierzchni membrany, a następnie

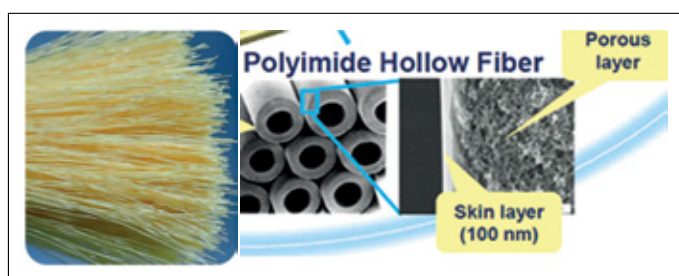
dyfundują w poprzek przegrody, a związku z różnicą ciśnień i gradientu stężeń gazu ulegają desorpcji po drugiej (niskociśnieniowej) stronie membrany jako tzw. **permeat**. Strumień wlotowy gazu po kontakcie z membraną, zubożony o składniki przechodzące szybciej przez membranę, określany jest na wylocie jako **retentat**.

Technologie membranowe są szeroko stosowane w procesach separacji ze względu na niewielkie rozmiary instalacji, brak części ruchomych, brak jakichkolwiek odpadów, łagodne warunki pracy i zdolność do przeprowadzania separacji, które mogą nie być technicznie lub ekonomicznie wykonalne w przypadku innych technologii (Yong et al., 2021).

Dostępne w handlu membrany polimerowe do separacji gazów, w tym H_2/CH_4 , oparte są na bazie polimerów szklanych, takich jak: octan celulozy (CA), poliimidowe (PI), poliwęglanowe (PA) i polisulfonowe (PS), i najczęściej mają asymetryczną strukturę (Baker, 2002; Brinkmann, 2020).

Membrany produkują się albo jako płaskie spiralnie zwijane, albo jako włókna kapilarne (ang. *hollow fiber*), które do zastosowań przemysłowych montowane są jako moduły. Kierunki i wielkości przepływów w tych modułach są tak samo ważne jak wewnętrzne właściwości separacyjne membrany (Scholes et al., 2012). Stosunek objętościowego przepływu strumienia permeatu do objętościowego przepływu gazu wlotowego określamy jako **współczynnik podziału Θ** (ang. *stage cut*) i jest to bardzo ważny parametr, który w dużym stopniu wpływa na stopień separacji mieszanin gazowych, a jednocześnie jest istotny w wytycznych procesowych i projektowych.

W artykule Gao et al. (2021) stwierdzono, że poliimidy znajdują coraz większe zastosowanie w separacji membranowej ze względu na ich doskonałą stabilność fizykochemiczną i mechaniczną w szerokim zakresie temperatur. Białecka i Nowak (2006) prowadzili badania separacji wodoru z gazów procesowych na membranach poliimidowych w kierunku uzyskania jak najwyższego stężenia wodoru w celu jego późniejszego dalszego wzbogacania (np. techniką PSA). Badania te odbywały się przy ciśnieniach wlotowych poniżej 10 bar i przy wysokich współczynnikach podziału (około 0,5).



Rysunek 1. Wiązka poliimidowych membran kapilarnych i ich powiększenie (zdjęcie UBE)

Figure 1. A bundle of polyimide hollow fiber membranes and their magnification (UBE photo)

Do badań opisywanych w niniejszym artykule wybrano kapilarne membrany poliimidowe firmy UBE o kształcie mikrokapilary (ang. *hollow fiber membrane*) i o przekroju o asymetrycznej strukturze (rysunek 1).

Grubsza porowata warstwa od wewnątrz, stanowiąca wsparcie konstrukcyjne (ang. *support*) kapilary, stopniowo ulega zagęszczeniu aż do zewnętrznej powłoki, o dużej gęstości, będącej cienką nieporowatą warstwą. Badania prowadzono na wysokociśnieniowym module o długości około 30 cm składającym się z kilkuset włókien poliimidowych z zewnętrzkapilarnym przepływem gazu wlotowego (rysunek 2).



Rysunek 2. Zdjęcie wiązki kapilarnych membran poliimidowych stanowiących wnętrze modułu

Figure 2. Photo of a bundle of capillary polyimide membranes inside the module

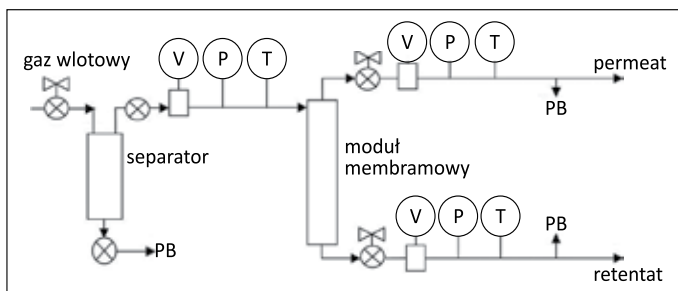
Kapilary z jednej strony modułu uszczelnione (zalne) są specjalnym tworzywem o wysokiej wytrzymałości mechanicznej, oddzielającym część wysokociśnieniową od permeacyjnej – niskociśnieniowej.

Opis instalacji

Badania separacji 15% wodoru w metanie zasilanym gazem z butli prowadzono na module membranowym pozwalającym na uzyskanie dowolnego ciśnienia w zakresie do 100 bar. Instalacja zaopatrzona była w reduktory gazowe, zawory kulowe (odcinające), zawory regulacyjne i przepływomierze – wszystkie ze stali nierdzewnej o jakości SS316 lub wyższej. Uproszczony schemat instalacji przedstawiono na rysunku 3.

W module część gazu przechodziła przez materiał membrany do wnętrza kapilar, skąd była odbierana jako permeat. Reszta gazu odprowadzana była z przestrzeni międzywłóknowej modułu jako retentat.

Przed wejściem na moduł membranowy odczytywano bieżące ciśnienie i temperaturę gazu. W strumieniach produktowych mierzono ponownie ciśnienie i temperaturę, a poziom przepływu regulowany był reduktorami. Ze względów bezpieczeństwa



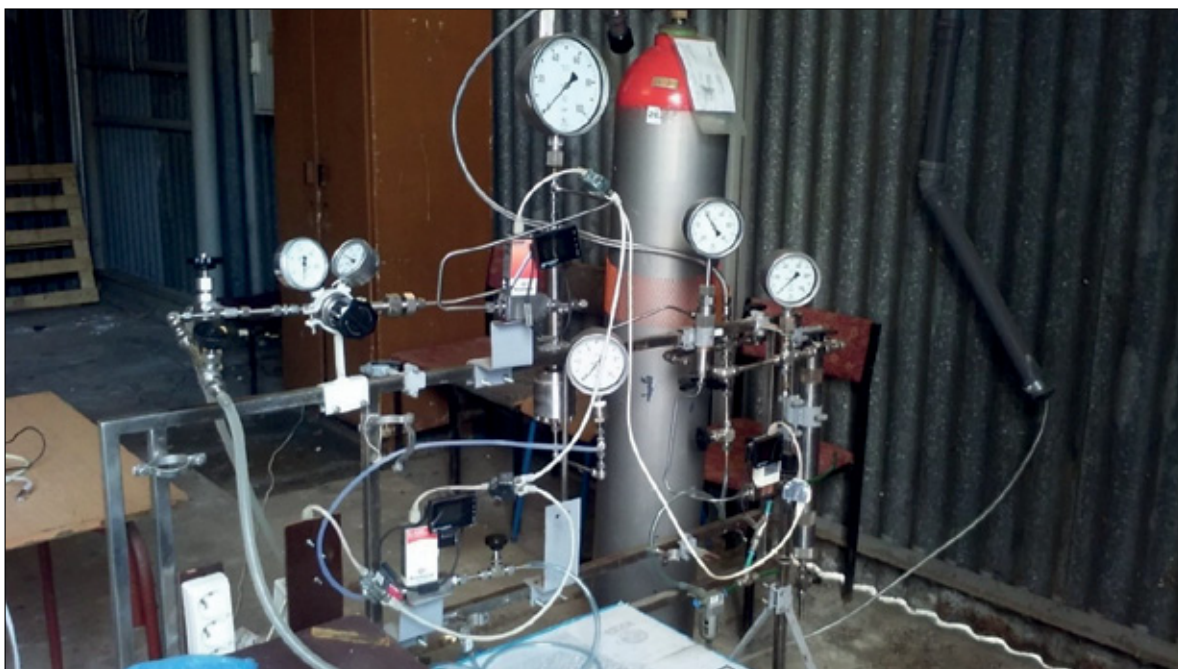
Rysunek 3. Schemat instalacji do badania rozdzielania mieszaniny metan–siarkowódor na module membranowym. Oznaczenia: PB – miejsce poboru próbek, V – przepływomierze Bronkhorst High-Tech, P – manometry, T – termometry

Figure 3. Scheme of the installation for testing the separation of the methane-hydrogen sulphide mixture on the membrane module. Markings: PB – sampling point, V – Bronkhorst High-Tech flow meters, P – manometers, T – thermometers

i mieszanki metanowo-wodorowej (15% H₂). Jak wynika z tego wykresu (rysunek 5) przepływ permeatu – mieszanki metanowo-wodorowej (przy przepływie gazu wlotowego do modułu około 10 dm³/min) zawiera się pomiędzy przepływami permeatu dla czystego metanu i wodoru.

Po wykonaniu kalibracji przepływomierzy (niepewność ±1%) przeprowadzono badania wydajności przepływów permeatu (na wolny wypływ) przez membranę w zależności od ciśnienia i natężenia przepływu gazu wlotowego, czyli mieszanki 15% wodoru w metanie. Na rysunku 6 zestawiono zbiorcze wyniki tych testów.

Z rysunku 6 można zaobserwować, że przepływ permeatu w dużym stopniu zależy od ciśnienia gazu wlotowego. Jednocześnie, jak wynika z wykresu, przepływy permeatu rosną wraz ze wzrostem przepływu gazu wlotowego, przy czym



Rysunek 4. Instalacja badawcza separacji mieszaniny wodorowej z zastosowaniem modułu membranowego

Figure 4. Research installation for hydrogen mixture separation using a membrane module

produkcyjne gazy były wprowadzone do kolektora odprowadzającego je poza pomieszczenie badawcze.

Na zdjęciu na rysunku 4 przedstawiono ogólny widok instalacji.

Próbki gazu (permeatu i retentatu) do analizy jego składu (na zawartość wodoru i metanu) pobierano po ustabilizowaniu się wskazań PVT w zadanych warunkach pomiarowych.

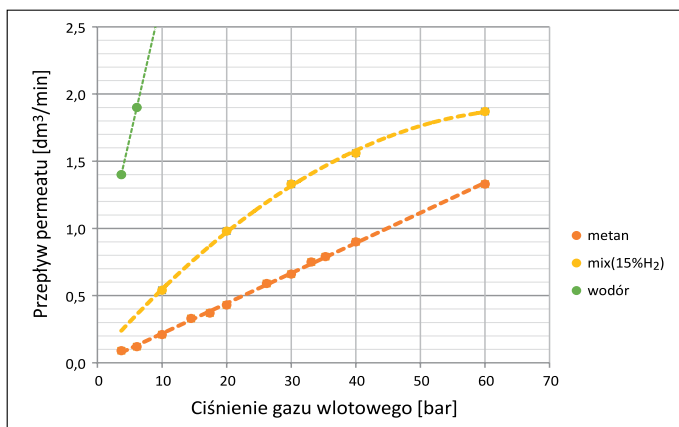
Badania separacji membranowej

Na rysunku 5 przedstawiono kształtowanie się przepływów permeatu w zależności od ciśnienia dla metanu, wodoru

zmiany przepływu permeatu są bardziej widoczne w wyższych ciśnieniach utrzymywanych w module membranowym. Ten efekt jest ściśle związany z większą ilością wodoru „świeżo” dopływającego do modułu i szybciej przenikającego przez membranę.

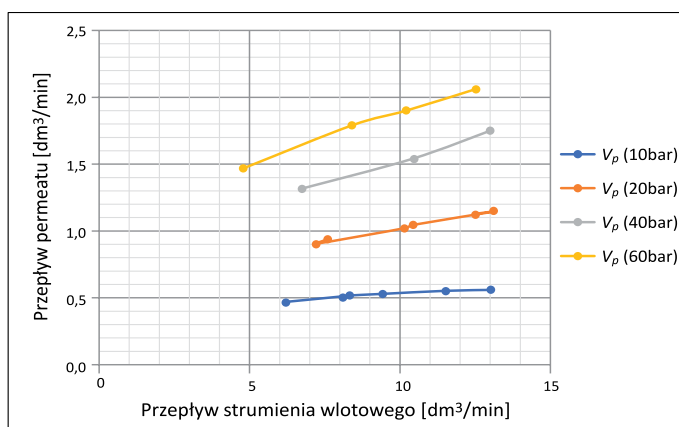
Na podstawie tych wstępnych testów, pozwalających ocenić zakres uzyskiwanych wyników i dokonać wyboru warunków wykonania zasadniczych badań (pojedynczy moduł), postanowiono je przeprowadzić w trzech zakresach ciśnień:

- 1) dla ciśnienia wlotowego 30 bar i wolnego wypływu permeatu (ciśnienie atmosferyczne);
- 2) dla ciśnienia wlotowego 60 bar i ciśnienia permeatu na poziomie 4 bar;



Rysunek 5. Kształtowanie się przepływów permeatu w zależności od ciśnienia dla metanu, wodoru i mieszanki metanowo-wodorowej (15% H₂)

Figure 5. Development of permeate flows depending on pressure for methane, hydrogen and methane-hydrogen mixture (15% H₂)



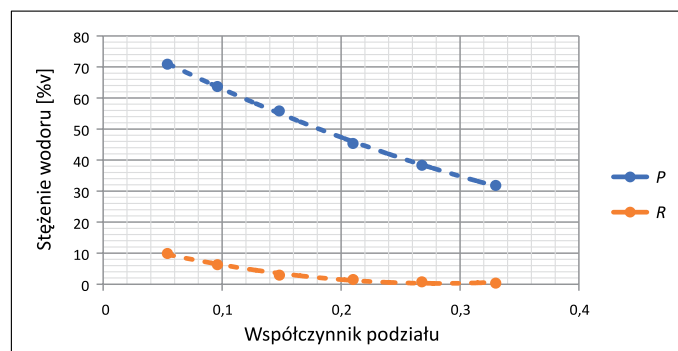
Rysunek 6. Zależność przepływu permeatu V_p (wolny wypływ) od przepływu gazu wlotowego pod różnymi ciśnieniami (10–60 bar) dla modułu membranowego

Figure 6. Dependence of the permeate flow V_p (free flow) on the inlet gas flow at different pressures (10–60 bar) for a membrane module

3) dla ciśnienia wlotowego 60 bar i ciśnienia permeatu na poziomie 1 bar.

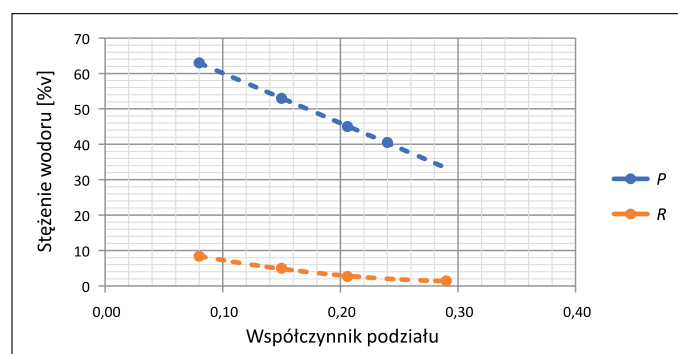
Wybór tych warunków zakresu ciśnień nawiązuje do warunków, w których permeat będzie sprężany, a jego ciśnienie na wlocie do sprężarki będzie miało istotny wpływ na parametry ekonomiczne całości procesu. Wyniki badań tych wariantów zakresów ciśnień przedstawiono w odniesieniu do **współczynnika podziału** (ang. *stage cut*), który określa stosunek wielkości przepływu permeatu do przepływu gazu wlotowego (jest to uniwersalny parametr wykorzystywany do doboru optymalnej skali wielkości modułu membranowego przy projektowaniu procesu separacji gazów). Wykonano kilkadziesiąt pomiarów w trzech seriach testów w ustalonych warunkach przepływów, pobierając każdorazowo próbki permeatu i retentatu do analiz chromatograficznych.

Niepewność oznaczeń chromatograficznych kształtowała się na poziomie 0,55%. Wyniki poszczególnych serii testów przedstawiono na rysunkach 7–9.



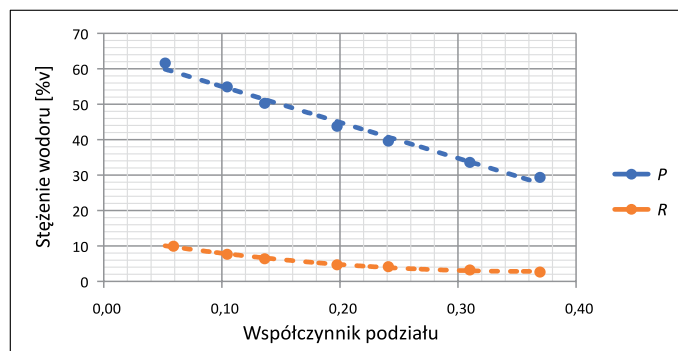
Rysunek 7. Zależność stężenia wodoru w permeacie (P) i retentacie (R) od współczynnika podziału przy ciśnieniu wlotowym 30 bar i wolnym wypływie do atmosfery permeatu

Figure 7. Dependence of the hydrogen concentration in the permeate (P) and retentate (R) on the partition coefficient at an inlet pressure of 30 bar and free discharge to the permeate atmosphere



Rysunek 8. Zależność stężenia wodoru w permeacie (P) i retentacie (R) od współczynnika podziału przy ciśnieniu wlotowym 60 bar i ciśnieniu permeatu 1 bar

Figure 8. Dependence of hydrogen concentration in permeate (P) and retentate (R) on the partition coefficient at 60 bar inlet pressure and 1 bar of permeate



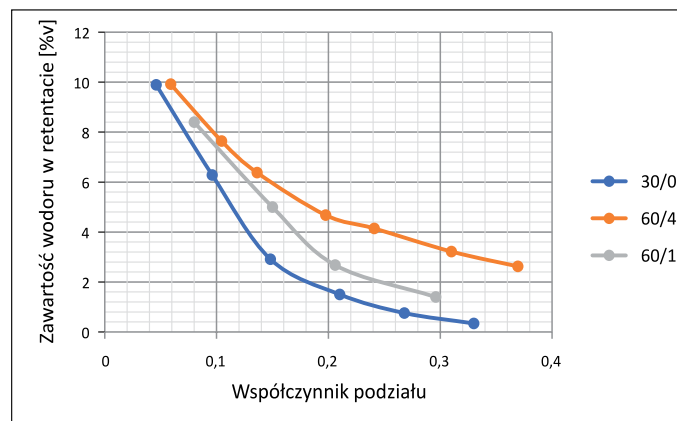
Rysunek 9. Zależność stężenia wodoru w permeacie (P) i retentacie (R) od współczynnika podziału przy ciśnieniu wlotowym 60 bar i ciśnieniu permeatu 4 bar

Figure 9. Dependence of hydrogen concentration in permeate (P) and retentate (R) on the partition coefficient at 60 bar inlet pressure and 4 bar permeate

Oznaczenia zawartości wodoru w strumieniach produkcyjnych prowadzono chromatograficznie (Clarus 680 Perkin Elmer – ARNEL), opierając się na zestawie kalibrowanych mieszanek gazów o różnych stężeniach wodoru. Jak wynika z tej serii testów (30/0 bar), w permeacie uzyskiwano od 30% do ponad 70% wodoru, natomiast w wysokociśnieniowym retentacie osiągnięto obniżenie zawartości wodoru z 15% do wartości poniżej 1% już przy współczynniku podziału około 0,25 (25% strumienia wlotowego). Przy niższych współczynnikach podziału (dużych przepływach gazu wlotowego) można uzyskać dowolnie wymagany obniżony poziom stężenia wodoru w retentacie.

W ewentualnym zastosowaniu tej technologii do regulacji zawartości wodoru, np. do produkcji HCNG, najczęściej wykorzystywany będzie surowiec o ciśnieniu około 60 bar, a wymagane ciśnienie odbioru permeatu będzie wyższe niż atmosferyczne. Wyniki takich badań przedstawiono na rysunkach 8–10. Jak wynika z danych przedstawionych na wykresach, dla podwyższonych ciśnień permeatu i 60 bar strumienia wlotowego stopień separacji jest nieco niższy niż dla ciśnienia atmosferycznego. W celu przeprowadzenia analizy porównawczej i lepszej ilustracji powyższych wyników na rysunkach 10 i 11 przedstawiono je w innej formie.

W przypadku zastosowania procesu membranowego do regulacji stężenia wodoru w HCNG, dla różnej wielkości (wydajności) stacji tankowania, przedstawione dane mogą być cenną wskazówką inżynierską co do wykonania projektu i zestawienia urządzeń. W zależności od rodzaju i wielkości floty samochodów napędzanych paliwem gazowym typu CNG/HCNG skala odpowiednich urządzeń (modułów membranowych, sprężarek i wysokociśnieniowych zbiorników magazynowych) powinna zostać dla danej stacji odpowiednio zaprojektowana i wykonana.

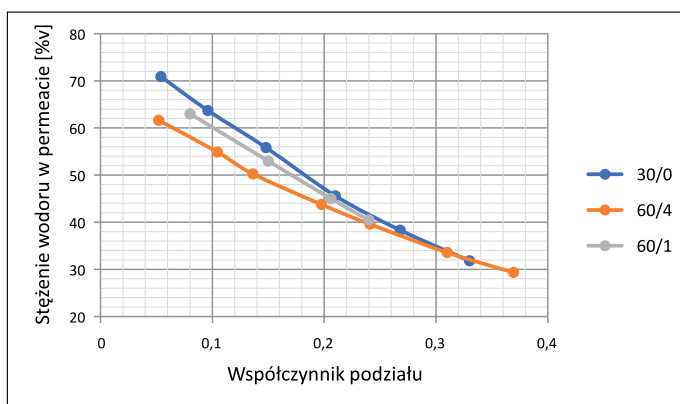


Rysunek 11. Zależność stężenia wodoru w retentacie od współczynnika podziału przy stosunkach ciśnień wlotowego i permeatu: 30 : 0; 60 : 1; 60 : 4 bar

Figure 11. Dependence of hydrogen concentration in the retentate on the partition coefficient at the ratio of inlet and permeate pressures 30/0, 60/1, 60/4 bar

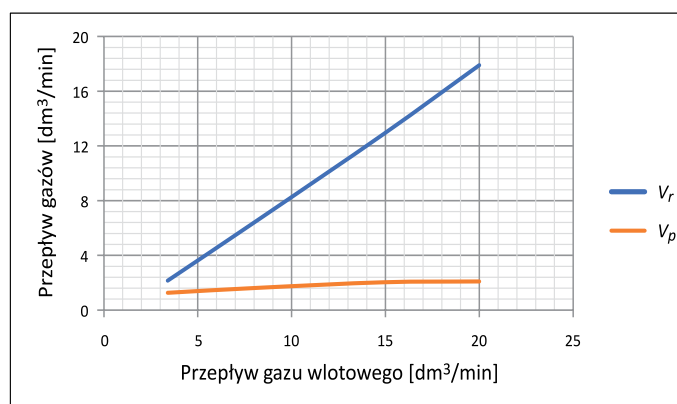
W testowanym module z poliimidowymi membranami zaprojektowanym do przepływów strumieni w układzie przeciwproudowym uzyskano możliwość regulowania w szerokim zakresie stężenia wodoru poniżej 15% w strumieniu retentatu (a w razie konieczności – zwiększenia zawartości H₂ powyżej 15% poprzez wykorzystaniu permeatu). Podział strumienia gazu wlotowego (60 bar) na permeat (4 bar) i retentat przedstawiono na rysunku 12. Wybór wariantu z permeatem o ciśnieniu 4 bar ma znaczenie w związku z jego łatwiejszym dalszym zagospodarowaniem i ma wpływ szczególnie na ewentualne koszty sprężania (inwestycyjne i eksploatacyjne).

Jak wynika z rysunku 12, w omawianym wariancie (60/4 bar) ilość permeatu, czyli wzbogaconego w wodór strumienia produkcyjnego, jest znacznie mniejsza niż podstawowego produktu – HCNG.



Rysunek 10. Zależność stężenia wodoru w permeacie od współczynnika podziału przy stosunkach ciśnień wlotowego i permeatu: 30 : 0; 60 : 1; 60 : 4 bar

Figure 10. Dependence of the hydrogen concentration in the permeate on the partition coefficient at the ratio of inlet and permeate pressures 30/0, 60/1, 60/4 bar



Rysunek 12. Zależność przepływu gazów produktowych (retentatu, V_r i permeatu, V_p) od przepływu gazu wlotowego pod ciśnieniem 60 bar i permeatu – 4 bar

Figure 12. Relationship between the flow of product gases (retentate, V_r and permeate, V_p) on the flow of inlet gas at a pressure of 60 bar and permeate 4 bar

Na rysunku 13 przedstawiono zależność stężenia wodoru w retentacie (produkcie wysokociśnieniowym – HCNG) od przepływu gazu wlotowego przez moduł membranowy. Wzrost szybkości przepływu 15-proc. wlotowej mieszanki H_2 w metanie w module membranowym spowoduje, że tylko część wodoru „zdąży” przeniknąć przez membranę (do permeatu), w związku z czym jego stężenie będzie większe w retentacie.

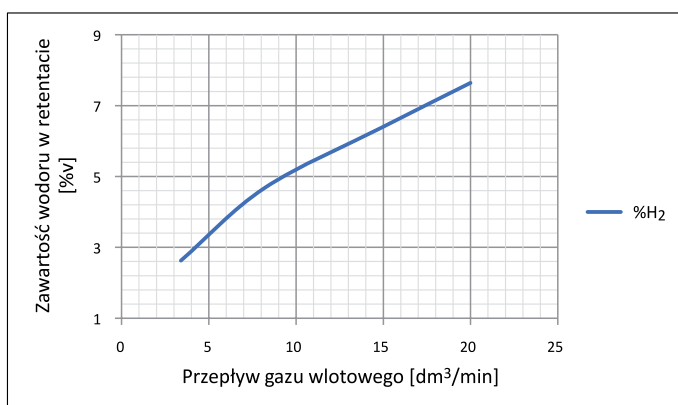
Na podstawie uzyskanych z badań danych wykonano obliczenia dla dobowej wydajności procesu (obniżania zawartości H_2 z bazowej mieszanki 15% H_2 w metanie) dla modułu HH-A02. Wyniki tych symulacji przedstawiono na rysunku 14.

Zastosowany w badaniach moduł membranowy pozwoli na uzyskanie paliwa HCNG zawierającego 8% wodoru (przy ciśnieniu 4 bar) z gazu wyjściowego (60 bar) o zawartości wodoru 15% z wydajnością do 30 m³/dobę. Taka ilość gazu

umożliwi napełnienie trzech butli o pojemności wodnej 65 dm³ do ciśnienia 200 bar. Jedna butla z kolei pozwala na przejechanie samochodem z silnikiem 1,8 cm³ dystansu około 300 km. Mniej korzystne wydajności HCNG można uzyskać dla zawartości wodoru wynoszącej 4% – około 5 m³/dobę. Natomiast przy niższym ciśnieniu permeatu badany moduł membranowy pozwala na uzyskanie większych objętości hytanu: dla stężenia 8% wodoru – około 35 m³, a dla 4% – około 12 m³/dobę. W przypadku potrzeby tankowania większej floty autobusów można zastosować moduły o wyższej wydajności oferowane przez ich producenta.

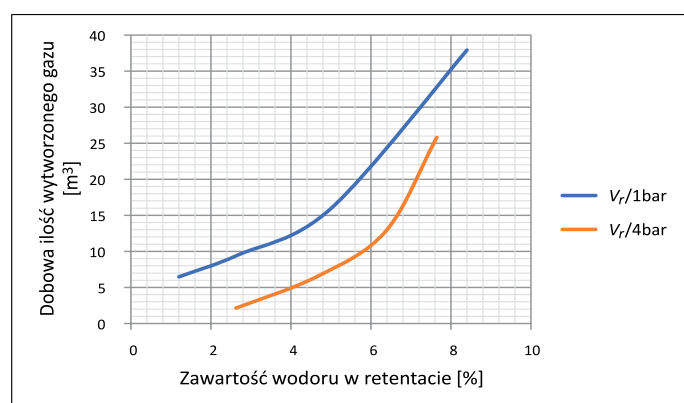
Istnieje także możliwość wytworzenia mieszanki H_2-CH_4 o zawartości wodoru wyższej niż stężenie gazu wlotowego poprzez wykorzystanie permeatu (zawierającego kilkadziesiąt procent H_2), który po sprężeniu może być dodawany w odpowiedniej proporcji do strumienia wyodrębnionego z rurociągu źródłowego. W ten sposób można uzyskać kolejne mieszanki HCNG np. o zawartości 18% H_2 (tak jak standard HCNG w Indiach) lub nawet 30% HCNG.

Wykorzystanie paliw alternatywnych, w tym także wodoru i jego mieszanek z gazem ziemnym, jest widocznym trendem, szczególnie w pojazdach komunikacji miejskiej, ograniczającym emisję pyłów i szkodliwych substancji. Podejmowane działania legislacyjne powinny prowadzić do upowszechnienia tej technologii z uwagi na jej niewątpliwe walory ekologiczne oraz ekonomiczne.



Rysunek 13. Zależność stężenia wodoru w produkcie wysokociśnieniowym (HCNG) od przepływu gazu wlotowego przez moduł membranowy

Figure 13. Dependence of hydrogen concentration in the high-pressure product (HCNG) on the inlet gas flow through the membrane module



Rysunek 14. Porównanie zależności produkcji dobowej wytworzonego gazu HCNG w instalacji membranowej przy ciśnieniach permeatu 4 bar i 1 bar (wlot 60 bar) od zawartości H_2 w retentacie

Figure 14. Comparison of the dependence of the daily production of HCNG produced in the membrane installation with the permeate pressure of 4 and 1 bar (inlet 60 bar) on the H_2 concentration in the retentate

Podsumowanie

W opisywanych badaniach założono, że w najbliższych latach pojawią się odcinki gazociągów, którymi transportowana będzie mieszanka gazu ziemnego z wodorem (HCNG), lokalnie wykorzystywana jako paliwo alternatywne. Mieszanki wodoru o zdefiniowanym stężeniu z gazem ziemnym mogą mieć wiele zastosowań, np. do zasilaniem silników, w tym silników spalinyowych pojazdów samochodowych. Wychodząc naprzeciw zróżnicowanym wymaganiom dotychczasowych użytkowników CNG w aspekcie technicznych możliwości przejścia na HCNG o różnych zawartościach wodoru, w niniejszym artykule podjęto próbę wykazania, że możliwe jest dopasowanie stężenia H_2 do ich potrzeb z wykorzystaniem technologii membranowej. Na laboratoryjnej instalacji ciśnieniowej z modulem membranowym do separacji gazów wykonano pomiary przepływu i ciśnienia oraz stężenia gazów wlotowych i produktowych. Zawartość wodoru z 15% w gazie wlotowym wzrasta kilkakrotnie w strumieniu permeatu (do 75%) i obniża się w wysokociśnieniowym strumieniu retentatu (HCNG – w zakresie 1–12%). Na podstawie uzyskanych wyników badań wykonano obliczenia dla dobowej wydajności testowanego modułu.

Przykładowo w przypadku wytwarzania mieszaniny 8% H₂ z CNG w wariacie ciśnieniowym 60/4 bar uzyskuje się jej około 30 m³/dobę, a wariacie 60/1 bar – około 35 m³/dobę.

Wykonane badania i obliczenia wykazały możliwość zastosowania technologii membranowej do regulacji zawartości wodoru w mieszance z gazem ziemnym. Wyniki testów dowiodły możliwości dokonania znaczących zmian w składach strumieni produktowych z zastosowaniem procesu separacji membranowej. Na podstawie wyników badań określono możliwości wykorzystania rozdzielu na membranach mieszanin CH₄-H₂ w aspekcie dopasowania składu HCNG do wymagań różnego typu pojazdów lub innych zastosowań. Stacja tankowania HCNG mogłaby dysponować kilkoma dystrybutorami gazu zawierającymi np. 4%, 8% i 15% wodoru (lub inne wymagane stężenia H₂ do 30%).

Wyniki niniejszej pracy mogą służyć opracowaniu wytycznych do projektu uniwersalnego punktu tankowania HCNG. Wykorzystując nawet jeden moduł membranowy i sprężarki z zespołem zbiorników magazynowych o wielkości dostosowanej do potencjalnej floty odbiorców o różnych wymaganiach, można wytworzyć kilka rodzajów HCNG. W przypadku potrzeby tankowania większej floty autobusów można zastosować moduły o wyższej wydajności oferowane przez ich producenta.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Badania możliwości zmian składu mieszanek metanowo-wodorowych na membranach*, praca INiG – PIB; numer zlecenia: 0021/KE/2022, numer archiwalny: KE-4101-0009/2022.

Literatura

- Baker R.W., 2002. Future directions of membrane gas separation technology. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 41(6): 1393–1411. DOI: 10.1021/ie0108088.
- Baratta M., d'Ambrosio S., Misul D., Spessa E., 2014. Effects of H₂ Addition to Compressed Natural Gas Blends on Cycle-to-Cycle and Cylinder-to-Cylinder. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 136(5): 051502. DOI: 10.1115/1.4026163.
- Bard J., Gerhardt N., Selzam P., Beil M., Wiemer M., Buddensiek M., 2022. The limitations of hydrogen blending in the European gas grid. *Fraunhofer Institute for Energy Economics and Energy System Technology, Berlin*. <https://www.iee.fraunhofer.de/content/dam/iee/energiesystemtechnik/en/documents/Studies-Reports/FINAL_FraunhoferIEE_ShortStudy_H2_Blending_EU_ECF_Jan22.pdf> (dostęp: 2.06.2022).
- Białecka B., Nowak D.N., 2006. Separacja membranowa gazów procesowych. *Prace Naukowe GIG, Górnictwo i Środowisko*, 2: 73–80.
- Brinkmann T., 2020. Membrane technology for the separation of H₂ from natural gas. *Helmholtz-Zentrum Geesthacht Institute of Polymer Research, EERA Joint Programme FCH Virtual*. <<https://polymerforschung.de>> (dostęp: 2.09.2022).
- Burdzik R., Folega P., Konieczny Ł., Jaworski R., 2017. E-mobilność – wyzwanie teraźniejszości. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej*, 118: 17–28.
- Chłopek Z., 2012. Badanie zużycia energii przez samochód elektryczny. *Wydawnictwo Naukowe PIMOT*, 105–117.
- Del Toro A., Frailey M., Lynch F., Munshi S., Wayne S., 2005. Development and demonstration of hydrogen and compressed natural gas (H/CNG) blend transit buses. National Renewable Energy Laboratory Technical Report NREL/TP-540-38707 for Contract No. DEAC36-99-O10337.
- Economic Times, 2020. <<https://economictimes.indiatimes.com/industry/transportation/shipping/-/transport/what-is-hydrogen-enriched-compressed-natural-gas-and-why-are-delhi-buses-using-it/hcng-plant-inaugurated/slideshow/78804907.cms>> (dostęp: 10.11.2022).
- Eichlseder H., Schaffer K., Leitner D., Klell M., Sartory M., 2009. Potential of Synergies in a Vehicle for Variable Mixtures of CNG and Hydrogen. *SAE Technical Paper*, 2009-01-1420. DOI: 10.4271/2009-01-1420.
- Essen M. van, Gersen S., Dijk G. van, Emde M., 2021. Literature review on CNG/H₂ Mixtures for heavy-duty CNG vehicles. Report no. 10/21. *Concawe Special Task Force on Natural Gas (FE/STF-31), Brussels, Belgium*. <https://www.concawe.eu/wp-content/uploads/Rpt_21_10.pdf> (dostęp: 10.11.2022).
- Farese D., Keller J.O., Somerday B.P., 2010. Hydrogen effects on materials for CNG/H₂ blends. *International Hydrogen Fuel and Pressure Vessel Forum 2010, September 27–29, Beijing, China*.
- Fraile D., 2015. Green Hydrogen Market outlook. DOI: 10.13140/RG.2.1.1607.4720.
- Gao C., Liao J., Lu J., Ma J., Kianfar E., 2021. The effect of nanoparticles on gas permeability with polyimide membranes and network hybrid membranes: a review. *Reviews in Inorganic Chemistry*, 41(1): 1–20. DOI: 10.1515/revic-2020-0007.
- Garbala K., Piekarski W., Andrzejewska S., Witaszek K., 2016. Analysis of operating parameters and indicators of a compression ignition engine fuelled with LPG. *Zeszyty Naukowe. Transport / Politechnika Śląska*, 13: 13–22.
- Garbala K., Szczucka-Lasota B., Węgrzyn T., 2018. Badania niszczące reduktorów CNG instalacji samochodowych. *Zeszyty Naukowe. Organizacja i Zarządzanie / Politechnika Śląska*, 131: 131–140. DOI: 10.29119/1641-3466.2018.131.10.
- Gifford J.D., 2011. Survey and sustainability of energy technologies. *Graduate Theses and Dissertations. Iowa State University*.
- Gis W., Menes E., Waśkiewicz J., 2011. Paliwa gazowe w miejskiej komunikacji autobusowej w Polsce. *Transport Samochodowy*, 2: 71–95.
- HyGrid, 2021. Flexible Hybrid separation system for H₂ recovery from NG Grids. *Program Horyzont HyGrid, Identyfikator umowy o grant: 700355*. <<https://cordis.europa.eu/project/id/700355/pl>> (dostęp: 2.09.2022).
- Karner D., Francfort J.E., 2003. Advanced Vehicle Testing Activity: High-Percentage Hydrogen/CNG Blend Ford F-150 Operating Summary. U.S. Department of Energy Assistant Secretary for Energy Efficiency and Renewable Energy Under DOE Idaho Operations Office. DOI: 10.2172/809113.
- Klell M., Eichlseder H., Sartory M., 2010. Variable Mixtures of Hydrogen and Methane in the Internal Combustion Engine of a Prototype Vehicle – Regulations, Safety and Potential. *International Journal of Vehicle Design*, 54(2): 137–155. DOI: 10.1504/IJVD.2010.035356.
- Klell M., Eichlseder H., Sartory M., 2012. Mixtures of Hydrogen and Methane in the Internal Combustion Engine – Synergies, Potential and Regulations. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(15): 11531–11540. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.03.067.
- Kouchachyili L., Entchey E., 2018. Power to gas and H₂/NG blend in SMART energy networks concept. <<https://www.fchea.org/in-transition/2021/3/8/hydrogen-blending/>> (dostęp: 8.03.2022).

- Kumar N., Arora B.B., Maji S., 2022. Influence of Alternative Fuels on Exhaust Emissions of IC Engine. *Renewable Energy Optimization, Planning and Control*, Springer, 11–29. DOI: 10.1007/978-981-16-4663-8_2.
- Lim G., Lee S., Park Ch., Choi Y.D., Kim Ch., 2013. Effects of compression ratio on performance and emission characteristics of heavy-duty SI engine fuelled with HCNG. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(11): 4831–4838. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2013.01.188.
- Ma F., Li S., Zhao J., Qi Z., Deng J., Naeve N., He Y., Zhao S., 2012. Effect of compression ratio and spark timing on the power performance and combustion characteristics of an HCNG engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(23): 18486–18491. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.08.134.
- Nanthagopal K., Rayapati S., Elango T., Ponnusamy B., Annamalai K., Krishnamoorthy A., 2011. Hydrogen Enriched Compressed Natural Gas (HCNG): A Futuristic Fuel For Internal Combustion Engines. *Termal Science*, 15(4): 1145–1154. DOI: 10.2298/TSCI100730044N.
- Navarro E., Leo T.J., Corral R., 2013. CO₂ emissions from a spark ignition engine operating on natural gas-hydrogen blends (HCNG). *Applied Energy*, 101: 112–120. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.02.046.
- Pal N.K., 2009. Successful Adoption of CNG and Emerging CNG-H₂ Program in India. *Proceedings to US DOT and DOE Workshop Compressed Natural Gas and Hydrogen Fuels: Lesson Learned for the Safe Development of Vehicles, Washington DC, 10–11 December*.
- Pandey V., Badruddin I.A., Yunus Khan T.M., 2002. Effect of H₂ blends with compressed natural gas on emissions of SI engine having modified ignition timings. *Fuel*, 321(23): 123930. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.123930.
- Perujo A., Dardiotis Ch., Manfredi U., 2013. Evaluation of a Euro 4 vehicle with various blends of CNG/H₂ fuel. *Reference Report by the Joint Research Centre of the European Commission, Luxembourg*. DOI: 10.2790/15791.
- Piskowska-Wasiak J., 2017. Doświadczenia i perspektywy procesu Power to Gas. *Nafta-Gaz*, 73(8): 597–604. DOI: 10.18668/NG.2017.08.07.
- Ruze M., Wang J., Zhang W., An Z., Wenjun L., Meng Z., Huang Z., 2021. Effect of high hydrogen enrichment on the outer-shear-layer flame of confined lean premixed CH₄/H₂/air swirl flames. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(34): 17969–17981. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.02.181.
- Saaidia R., Oyouni R., Almuslam H., 2020. Effect of optimized intake manifold geometry on behaviors and emission level of H₂CNG fueled engine. *8th European Conference on Renewable Energy Systems Istanbul/Turkey, 9–11 June*.
- Scholes C.A., Stevens G.W., Kentish S.E., 2012. Membrane gas separation applications in natural gas processing. *Fuel*, 96: 15–28. DOI: 10.1016/j.fuel.2011.12.074.
- Tangöz S., Kahraman N., Akansu S.O., 2017. The effect of hydrogen on the performance and emissions of an SI engine having a high compression ratio fuelled by compressed natural gas. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(40): 25766–25780. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.04.076.
- Villante C., Pede G., Genovese A., Ortenzi F., 2013. Hydrogen-CNG Blends as Fuel in a Turbo-charged SI Ice: ECU Calibration and Emission Tests. *SAE Technical Paper*, 2013-24-0109. DOI: 10.4271/2013-24-0109.
- Wojtowicz R., 2019. An analysis of the effects of hydrogen addition to natural gas on the work of gas appliances. *Nafta-Gaz*, 99(8): 465–472. DOI: 10.18668/NG.2019.08.03.
- Xu J., Zhang X., Liu J., Fan L., 2010. Experimental study of a single-cylinder engine fueled with natural gas–hydrogen mixtures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(7): 2909–2914. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2009.05.039.
- Yadav K., Sircar A., 2017. Hydrogen compressed natural gas and liquefied compressed natural gas: fuels for future. <<https://www.pdpu.ac.in/downloads/3%20Hydrogen-Compressed-Natural-Gas.pdf>> (dostęp: 31.05.2022).
- Yong W.F., Lau H.S., Zhang H., 2021. Composite hollow fibers for gas separation. *Hollow Fiber Membranes*, 385–405. DOI: 10.1016/B978-0-12-821876-1.00001-9.
- Zareei J., Rohani A., Nuñez A.J.R., 2022. The effect of EGR and hydrogen addition to natural gas on performance and exhaust emissions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(50): 21565–21581. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.04.294.
- Zhunqing H., Nannan S., Yi J., Xin Z., 2022. Experimental research on a blended hydrogen-fuel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(19): 7115–7121. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.05.053.

Akty prawne i dokumenty normatywne

PSW, 2021. Uchwała nr 149 Rady Ministrów z dnia 2 listopada 2021 r. w sprawie przyjęcia „Polskiej strategii wodorowej do roku 2030 z perspektywą do 2040 r.”. *Monitor Polski* z 2021 r., 7 grudnia, poz. 1138.



Dr Andrzej JANOCZA
Adiunkt w Zakładzie Technologii Eksploatacji
Płynów Złożowych
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: andrzej.janocha@inig.pl



Dr Piotr JAKUBOWICZ
Adiunkt w Zakładzie Technologii Eksploatacji
Płynów Złożowych
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: piotr.jakubowicz@inig.pl