

Badania szczelności połączeń sieci dystrybucyjnej w aspekcie wykorzystania wodoru – część I: projekt stanowiska i wstępne wyniki

Tightness testing of distribution network connections in terms of hydrogen use – part I: test rig design and preliminary results

Marcin Kroczeł, Wojciech Kostowski, Kinga Kulik^{*}

Słowa kluczowe: wodór, dyfuzja, sieci gazowe, dystrybucja, zarządzanie ryzykiem

Streszczenie

Transport wodoru istniejącymi sieciami dystrybucji gazu ziemnego wiąże się z ryzykiem nieszczelności przez dotychczas szczelne elementy sieci. W artykule przedstawiono projekt dwóch stanowisk badawczych, do badania procesu dyfuzji wodoru przez wybrane elementy sieci, zwłaszcza różnego rodzaju połączenia rozłączne, w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Przedstawiono testowe wyniki badań oraz stwierdzono, że stanowisko II generacji jest gotowe do kontynuacji badań dla szerszego zakresu obiektów i parametrów.

Keywords: hydrogen, diffusion, gas networks, distribution, risk management

Abstract

Transporting hydrogen through existing natural gas distribution networks involves the risk of leaks through previously leak-proof network components. The article presents a design for two test rigs for studying the process of hydrogen diffusion through selected network components, especially various types of pipeline connections, under near-real conditions. The first test results are presented and it is concluded that the second-generation test station is ready to continue testing for a wider range of objects and parameters.

1. Wstęp

Wodór postrzegany jest jako jeden z kluczowych elementów transformacji energetycznej. Wodór odnawialny, produkowany w procesie elektrolizy z wykorzystaniem OZE, stanowi czyste paliwo, które może znacząco ograniczyć emisję gazów cieplarnianych w sektorach, gdzie redukcja emisji jest trudna, takich jak: przemysł ciężki, transport lotniczy czy morski. Jego potencjał jest bardzo wysoki — zarówno w kontekście magazynowania energii, jak i budowy niezależności energetycznej państw.

Jednym z rozważanych kierunków wykorzystania wodoru jest przesył, magazynowanie i dystrybucja, przy użyciu istniejącej infrastruktury gazu ziemnego. Rozważane są zarówno projekty mieszania wodoru z gazem ziemnym (np. w celu przejęcia nadwyżek niemożliwych do zagospodarowania), jak i niezależnej infrastruktury do transportu czystego wodoru.

Pomimo licznych zalet, wdrażanie technologii wodorowych nie jest pozbawione wyzwań i zagrożeń. Wodór wiąże się z szeregiem ryzyk — od technicznych i ekonomicznych po środowiskowe i społeczne. Problemy związane z kosztowną infrastrukturą, ograniczoną efektywnością energetyczną, a także bezpieczeństwem przechowywania i transportu wodoru, wymagają szczegółowej analizy i odpowiedzialnego podejścia.

Dotychczasowe systemy gazowe — w tym rury, złączki, zawory i inne elementy armatury — zostały zaprojektowane z myślą o trans-

porcie gazu ziemnego, który składa się głównie z metanu. Wodór posiada jednak odmienne właściwości fizykochemiczne, takie jak:

- bardzo mała cząsteczka (średnica kinetyczna: ok. 0,29 nm),
- wysoka przenikalność dyfuzyjna,
- podatność na zjawiska takie jak emisja przez mikroszczeliny, permeacja czy kruchość wodorowa.

Zagadnienie kompatybilności infrastruktury gazowej z wodorem zyskuje coraz większą uwagę w literaturze naukowej i technicznej. Badania wykazują, że:

- wodór ma znacznie wyższą zdolność przenikania przez materiały metalowe i polimerowe niż metan,
- typowe uszczelnienia elastomerowe (np. NBR, EPDM) wykazują znaczne przepuszczanie wodoru i mogą wymagać wymiany lub modernizacji,
- złącza gwintowane, kołnierzowe i skręcane stanowią potencjalne miejsca wycieków, szczególnie pod wpływem zmian ciśnienia i temperatury,
- zjawiska takie jak permeacja (dyfuzja wodoru przez ścianki materiału) i mikrowyciek przez nieszczelności strukturalne są trudne do wykrycia metodami klasycznymi (np. metodą mydlinową), dlatego stosuje się precyzyjne metody pomiaru stężenia wodoru w otoczeniu połączenia.

Opisane zjawiska wskazują na pewne **ryzyko**, wymagające odpowiedniego zarządzania. Jak wskazuje Muhlbauer [6], istnieje różnica

^{*} Marcin Kroczeł, mgr inż. Polska Spółka Gazownictwa, Kierownik Gazowni w Gliwicach; także: doktorant, Politechnika Śląska, marcin.kroczeł@polsl.pl, Wojciech Kostowski, dr hab. inż., Prof. PŚ, Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, wojciech.kostowski@polsl.pl, Kinga Kulik, mgr inż., absolwentka Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki, obecnie pracownik Instytutu Paliw i Energii, mail: kkulik@itpe.pl

między ryzykiem a zagrożeniem, przy czym *możemy zmienić poziom ryzyka bez zmiany występującego zagrożenia*. Przykładowo, w ruchu pieszych i pojazdów występuje zagrożenie potrącenia, jednak pieszy może zminimalizować ryzyko jego wystąpienia przechodząc w miejscu do tego przeznaczonym i oznaczonym. Podobnie, **dla sieci gazowych** można ograniczać ryzyko, np. przypadkowych uszkodzeń, przez takie działania jak: skuteczna komunikacja, przestrzeganie wyraźnych oznaczeń naziemnych i podziemnych, stosowanie procedur lokalizacji infrastruktury podziemnej, wykorzystanie map cyfrowych oraz ich ciągłą aktualizację, dokonanie uprzedniego wywiadu przed rozpoczęciem prac.

Ważnym parametrem, z punktu widzenia bezpieczeństwa dla gazu z domieszką wodoru lub czystego wodoru, jest granica wybuchowości, której zakres jest o wiele większy niż metanu od 4,1-75% dla H_2 [4]. Największe zagrożenie stanowią przestrzenie zamknięte typu przegrody ścienne w budynku lub otaczające rury, ale przestrzenie zamknięte mogą być również tworzone przez prądy powietrza, otwarte drzwi i przeszkody, które umożliwiają gromadzenie się wodoru do stężenia, przy którym możliwy jest wybuch. Czas, w którym palne stężenie wodoru jest obecne w zamkniętym pomieszczeniu domowym, jest dłuższy niż w przypadku gazu ziemnego, ponieważ strumień objętościowy uwalnianego wodoru jest zwykle większy niż dla gazu ziemnego, z powodu zwiększonej szybkości rozpraszania w ośrodku ze względu na większą wyporność [1]. Należy tu zwrócić uwagę, że wodor jest gazem bezwonny, co w oczywisty sposób zwiększa ryzyko w przypadku braku nawonienia. Pozytywnym aspektem jest fakt braku interakcji wodoru z THT, tj. najczęstszym odorantem stosowanym w dystrybucji gazu, co wykazano w badaniach Huszał i Jaworskiego [3].

Jak widać, jest wiele czynników mających wpływ na bezpieczeństwo transportu wodoru sieciami dystrybucyjnymi gazu ziemnego. Można je skwantyfikować i dokonać ilościowej jej oceny w oparciu o tzw. Quantitative Risk Assessment (QRA) [5]. Jest to jedna z metod określania potencjalnie niebezpiecznych zdarzeń ich prawdopodobieństwa wystąpienia i konsekwencji następstw.

W kontekście zapewnienia bezpieczeństwa eksploatacji sieci, w tym bezpieczeństwa użytkowników, bezpieczeństwa aktywów majątkowych oraz aby ograniczyć ewentualne spory prawne, operatorzy systemów gazowych powinni przygotować kompleksowe plany zarządzania ryzykiem i bezpieczeństwem działań związanych z wodorem – niezależnie od wymagań zawartych w istniejących, przepisach [2]. Tym niemniej, wciąż brakuje tu szczegółowej wiedzy techniczno-eksploatacyjnej. Zgodnie z raportami organizacji takich jak Hydrogen Europe, CEN, DVGW czy IEA, istnieje potrzeba sys-

tematycznych testów materiałów i złączy na zgodność z wodorem pod różnymi warunkami eksploatacyjnymi.

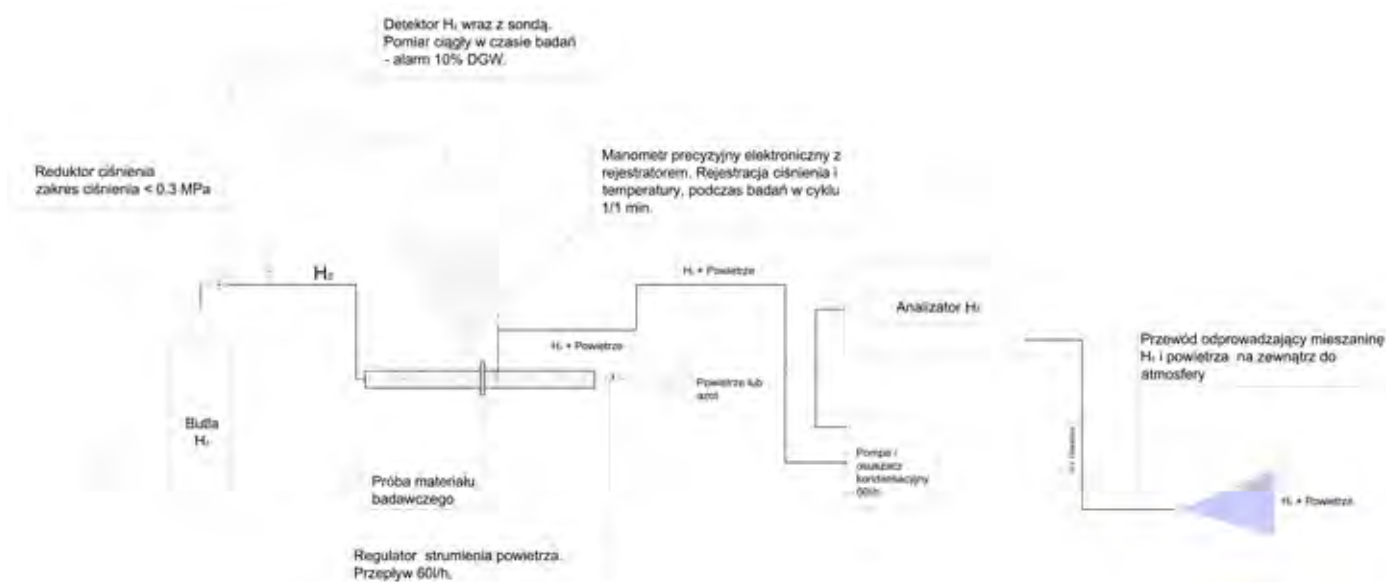
Z tego względu konieczne jest przeprowadzenie badań, które ocenia, w jakim stopniu wodor przenika przez połączenia rur i armaturę oraz czy istnieją ryzyka wycieków lub degradacji materiałowej, np. korozji spowodowanej kondensacją wilgoci, szczególnie w przypadku naziemnych części gazociągu. Czynniki te należy również wziąć pod uwagę przy transporcie wodoru lub mieszaniny wodoru sieciami dystrybucyjnymi [7].

Pierwszy etap proponowanych badań, prowadzony w warunkach zbliżonych do eksploatacyjnych, jest raportowany w niniejszej publikacji. Wyniki pozwolą ocenić przydatność istniejącej infrastruktury do transportu wodoru oraz sformułować zalecenia dla projektowania sieci w przyszłości.

2. Stanowisko badawcze I generacji – projekt i wstępne wyniki

W pierwszym etapie badań podjęto próbę bezpośredniego oszacowania przenikania wodoru przez materiały stosowane w przeszłości i obecnie do budowy sieci. W tym celu zostało przygotowane stanowisko badawcze I generacji. Stanowisko składa się z dwóch komór, pomiędzy którymi znajduje się **przegroda** w postaci **próbki badanego materiału**. Z jednej strony przegrody utworzona jest komora z gazem zawierającym H_2 , a za przegrodą – teoretycznie wolną od wodoru – zabudowana jest ścieżka transportująca gaz do analizatora. W pierwszych badaniach pomiar odbywał się bez przepływu gazu. Transport gazu przez przegrodę miał odbywać się dyfuzyjnie. Jednak z uwagi na długotrwały czas dyfuzji, przenikania wodoru przez przegrodę i jego małą koncentrację za przegrodą, nie osiągnięto spodziewanego efektu. Prawdopodobnie cząstki wodoru gromadziły się tuż za przegrodą i nie docierały do analizatora. Przyczyną takiego stanu była zbyt długa ścieżka transportu wodoru z komory do analizatora oraz mały przepływ grawitacyjny (wodoru w górę). Po analizie wyników stanowisko zmodyfikowano: skrócono przewód wejściowy do analizatora (rys. 2) oraz wymuszono przepływ cząstek gazu w komorze drugiej za przegrodą, przy pomocy pompy podciśnieniowej. Do transportu gromadzących się cząstek wodoru wykorzystano przepływ powietrza. Regulacja przepływu odbywała się za pomocą zaworu dławicowego.

Na rys. 1 przedstawiono schemat stanowiska pomiarowego po modyfikacji. Kolorem niebieskim zaznaczono obszar występowania wodoru. W celu zapewnienia bezpieczeństwa prowadzenia badań, po-



między kołnierzami umiejscowiono sondę detektora wodoru, służącą do wykrycia potencjalnych nieszczelności podczas próby, ponadto stosowano aerozol do testowania szczelności instalacji gazowych.



Rys. 2. Widok stanowiska I generacji po modyfikacji. 1 – wylot z komory, w której gromadzi się wodór po przeniknięciu przez próbkę, 2 – zawór wraz z manometrem, 3 – wężyk prowadzący do osuszacza kondensacyjnego i pompy, 4 – wlot powietrza wraz z zaworem dławicowym

Fig. 2. The modified version of the 1-st generation test rig. 1 – outlet from the chamber where hydrogen accumulates after passing through the sample, 2 – valve with pressure gauge, 3 – hose leading to the condensation dryer and pump, 4 – air inlet with throttle valve

Stanowisko przebudowano również w taki sposób, że pomiar wodoru odbywał się od razu za przegrodą (rys. 2.) W tym celu wywiercono otwór w niewielkiej odległości od kołnierza części rury (1) za próbką i przeniesiono w to miejsce zawór z manometrem (2). Powietrze wpływa do komory otworem sterowanym zaworem dławicowym (4). Wylot z komory (1) podłączone przez wężyk (3) do pompy z osuszaczem (rys. 3), która wytwarza podciśnienie w komorze, co wymusza napływ nowego powietrza zawór dławicowy (4).



Rys. 3. Osuszacz kondensacyjny wraz z pompą do analizatora

Fig. 3. Condensation dryer with pump for analyzer

Na rys. 4 przedstawiono podłączenie stanowiska do osuszacza kondensacyjnego wraz z pompą tłoczącą gaz do analizatora. Mieszanka wodoru i powietrza wylotu z komory (1) wpływa do osuszacza kondensacyjnego wlotem (2). W osuszaczu następuje obniżenie temperatury z około 20 °C do 3 °C, w celu pozbycia się wilgoci. Po osuszeniu mieszanina jest pompowana i wypływa z urządzenia przez otwór wylotowy (3) do filtra workowego (4), na którym osadzają się możliwe zanieczyszczenia, które powstały z procesu budowy stanowiska i osadziły się w jego wnętrzu. Stamtąd już bezpośrednio mieszanina jest tłoczona do analizatora.

Analizator wskazuje udział wodoru w mieszaninie z powietrzem, a także udziały innych składników. Z analizatora specjalnym przewodem mieszanina powietrza i wodoru odprowadzana jest na zewnątrz budynku, w celu zapewnienia bezpieczeństwa badań.



Rys. 4. Podłączenie stanowiska; 1 – wylot z komory (H_2 + powietrze), 2 – wlot do osuszacza i pompy, 3 – wylot z pompy, 3 – filtr workowy, 5 – wlot do analizatora CALOMAT 6

Fig. 4. Connection of the test rig: 1 – outlet from the chamber (H_2 + air), 2 – inlet to the dryer and pump, 3 – outlet from the pump, 3 – bag filter, 5 – inlet to the CALOMAT 6 analyzer

Pierwszym testom poddano próbkę materiału z worka polipropylenowego, materiału wykorzystywanego w gazownictwie do próbkowania poziomu nawonienia. Przygotowana próbka była zrobiona podwójnej warstwy worka polipropylenowego o powierzchni 100 cm². Grubość podwójnej warstwy stanowiącej barierę między komorami wynosi 100 μm.

Procedura pomiarowa

Pomiar wykonywano w sześciu próbach, przy ręcznym sterowaniu zaworem powietrza, tak aby zmniejszyć jego strumień. Pomiar zaplanowano w sześciu próbach pomiarowych po 15 minut każda. Celem próby było sprawdzenie zmiany wskazania analizatora, pod wpływem zmniejszającego się podciśnienia, wytwarzanego pod wpływem sterowania zaworem wlotu powietrza do komory za przegrodą. W każdej kolejnej próbie zmniejszano strumień powietrza poprzez przykręcanie zaworu. Ustalono, że w próbie nr I podciśnienie na manometrze nr 3 ma wynieść 0,01 bar, próba nr II (0,02 bar), próba nr III (0,03 bar), próba nr IV (0,05 bar), próba nr V (0,06 bar) oraz próba nr VI (0,08 bar). W tabeli 8 zestawiono wyniki przeprowadzonych pomiarów. Wodór był podawany z butli przy ciśnieniu 0,6 bar (manometr 2).

Podczas próby nr I odkręcono zawór wlotu powietrza tak, aby manometr wskazał – 0,01 bar, w takiej konfiguracji otwarcie zaworu było największe spośród wszystkich sześciu prób. Następnie w kolejnych próbach przykręcano zawór, tak aby uzyskać kolejno pożądane wartości ciśnień.

W kolejnych próbach przykręcano zawór wlotowy powietrza, tak aby zmniejszyć wartość ciśnienia w każdej kolejnej próbie pomiarowej. Przy wartości ciśnienia – 0,08 bar zawór był prawie całkowicie zakręcony, ale w taki sposób, by strumień powietrza w niewielkim stopniu przepływał. Udział objętościowy wodoru mimo niewielkich zmian pozostaje w zakresie od 0,06 % – wartość minimalna przy ciśnieniu – 0,01 bar oraz 0,12 % – wartość maksymalna przy ciśnieniu – 0,03 bar.

Dla danego poziomu ciśnienia wskazania analizatora były stałe w czasie, co świadczy o ustabilizowanych warunkach pomiarowych i niewielkich wahaniach w układzie. Wyniki wskazują, że przyrost stężenia wodoru w układzie zależy głównie od różnicy ciśnień, a nie od czasu trwania pojedynczego pomiaru przy ustalonych warunkach.

Stanowisko I generacji nie miało rejestracji ciągłej i rejestracja pomiaru odbywała się w sposób manualny, co ograniczyło możliwość wykonywania dłuższych badań. Dlatego, pomimo wykonania kilkunastu prób stwierdzono, że są one zbyt krótkie, aby dokonać jednoznacznej oceny procesu dyfuzji wodorowej. Ponadto, wykorzystany analizator spalin wymagałby kalibracji lub wymiany czujnika wodoru, który wskazywał wartość odniesienia 0,66% w sytuacji fizycznego

Tabela 1. Wybrane wyniki pomiarów na stanowisku nr 1. Ujemne wartości oznaczają podciśnienie
Table 1. Selected test results from test rig No. 1. Negative values represent vacuum pressure

Próba nr I			Próba nr II			Próba nr III		
czas, minuty	p, bar	Vol H ₂ %	czas, minuty	p, bar	Vol H ₂ %	czas, minuty	p, bar	Vol H ₂ %
1	-0,01	0,07	1	-0,02	0,07	1	-0,03	0,11
2	-0,01	0,07	2	-0,02	0,06	2	-0,03	0,11
3	-0,01	0,07	3	-0,02	0,07	3	-0,03	0,11
...	...	...	...	...	...	...	...	...
13	-0,01	0,06	13	-0,02	0,07	13	-0,03	0,12
14	-0,01	0,07	14	-0,02	0,07	14	-0,03	0,12
15	-0,01	0,06	15	-0,02	0,07	15	-0,03	0,11
Próba nr IV			Próba nr V			Próba nr VI		
czas, minuty	p, bar	Vol H ₂ %	czas, minuty	p, bar	Vol H ₂ %	czas, minuty	p, bar	Vol H ₂ %
1	-0,05	0,10	1	-0,06	0,08	1	-0,08	0,09
2	-0,05	0,10	2	-0,06	0,08	2	-0,08	0,09
3	-0,05	0,10	3	-0,06	0,09	3	-0,08	0,09
...	...	...	...	...	...	...	...	...
13	-0,05	0,09	13	-0,06	0,08	13	-0,08	0,08
14	-0,05	0,09	14	-0,06	0,07	14	-0,08	0,08
15	-0,05	0,09	15	-0,06	0,07	15	-0,08	0,08

braku wodoru w badanym obiekcie, wartości przedstawione w tabeli są już wartościami skorygowanymi po odjęciu poziomu odniesienia. Zaproponowano zatem projekt nowego stanowiska pomiarowego i skupienie się na ocenie przenikania wodoru w warunkach pracy układu sieci gazowej, ze szczególnym uwzględnieniem stosowanych połączeń.

3. Stanowisko badawcze II generacji – projekt i wstępne wyniki

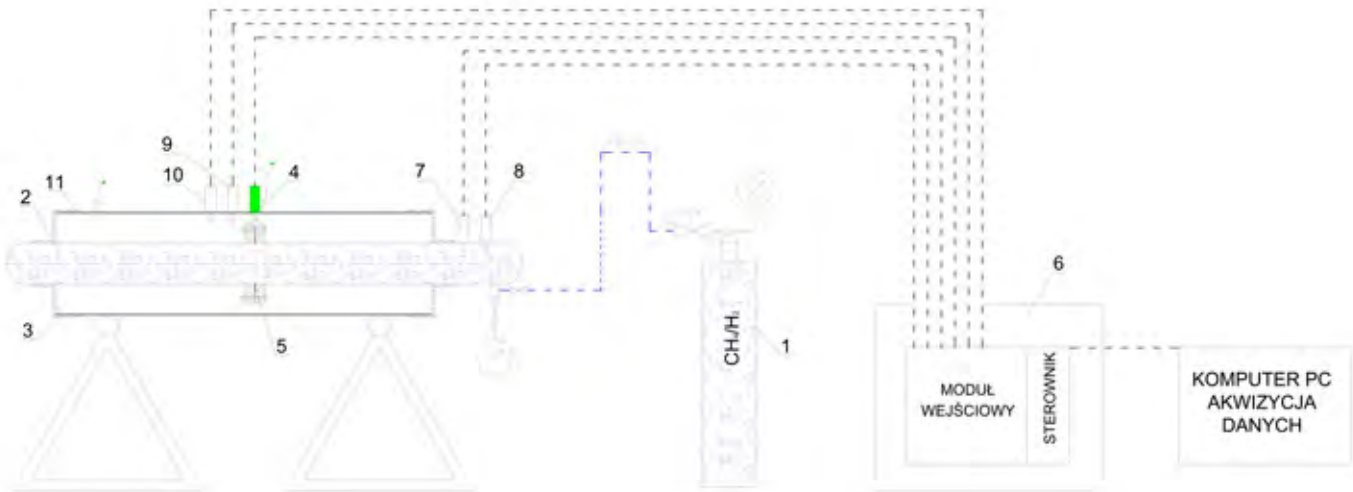
Stanowisko II generacji zaprojektowano tak, aby osiągnąć główny cel badań, tj. ilościowe określenie przenikania wodoru przez wybrane typy połączeń stosowanych w systemach dystrybucji gazu ziemnego. Wyniki pozwolą na ocenę przydatności obecnej infrastruktury do dystrybucji gazu zawierającego wodór lub czystego wodoru, a także na sformułowanie zaleceń projektowych dla nowych instalacji.

W badaniach skupiono się na określeniu stopnia przenikania cząstek wodoru przez połączenia rozłączne i stałe dla nowych i użytkowanych elementów sieci gazowych. Docelowo, badaniom poddane zostaną

następujące elementy sieci: połączenia kołnierzowe z uszczelnieniem klingerytowym, połączenia gwintowe z uszczelnieniem konopnym, śrubunki z uszczelnieniem gumowym, oraz zgrzewy elektrooporowe i doczołowe. Następnie poddana badaniom zostanie również armatura, ze szczególnym uwzględnieniem kompensatorów dławicowych.

Nowe stanowisko badawcze przedstawiono na rys. 5. Czujnik zastosowany w stanowisku badawczym mierzy koncentrację wodoru w sposób ciągły. Koncentracja ta konwertowana jest na sygnał odczytywany i rejestrowany za pomocą sterownika i modułu. Czujnik jest wyposażony w głowicę pomiarową z sensorem katalitycznym (pelistorowym). Sonda została zamontowana w komorze pomiarowej, bezpośrednio nad badanym połączeniem w taki sposób, aby skrócić do minimum drogę migracji gazu do sensora. Przed każdym pomiarem element badany poddany jest uproszczonej próbie szczelności, w celu potwierdzenia hermetycznego połączenia.

Fragment połączenia został przygotowany jako wzorcowy, dla porównania z próbkami fragmentu gazociągu zdemontowanego



Rys. 5. Schemat stanowiska II generacji do badania przenikania wodoru przez połączenia. 1. Zbiornik z gazem domieszkowym w ustalonych proporcjach, 2. Odcinek kontrolny układu sieci DN150 zawierający element testowy, 3. Komora hermetyczna detekcyjna DN400, 4. Czujnik wodoru katalityczny o zakresie 0-1000 ppm, 5. Element testowy: np. połączenie kołnierzowe, 6. System kontroli temperatury i ciśnienia, 7. Czujnik ciśnienia odcinka testowego 0-600kPa, 8. Czujnik temperatury gazu odcinka testowego, 9. Czujnik ciśnienia komory 0-2,5 kPa, 10. Czujnik temperatury gazu w komorze, 11. Manszeta uszczelniająca

Fig. 5. Scheme of the 2nd generation test rig for testing hydrogen permeation through joints. 1. Tank with admixture gas in fixed proportions, 2. Control section of the DN150 pipeline containing the test element, 3. Hermetic detection chamber DN400, 4. Catalytic hydrogen sensor, range 0-1000 ppm, 5. Test element: e.g. flange connection, 6. Temperature and pressure control system, 7. Test section pressure sensor 0-600 kPa, 8. Test section gas temperature sensor, 9. Chamber pressure sensor 0-2.5 kPa, 10. Chamber gas temperature sensor, 11. Sealing cuff



Rys. 6. Widok stanowiska badawczego II generacji. Odcinek testowy znajduje się wewnątrz komory i jest niewidoczny z zewnątrz

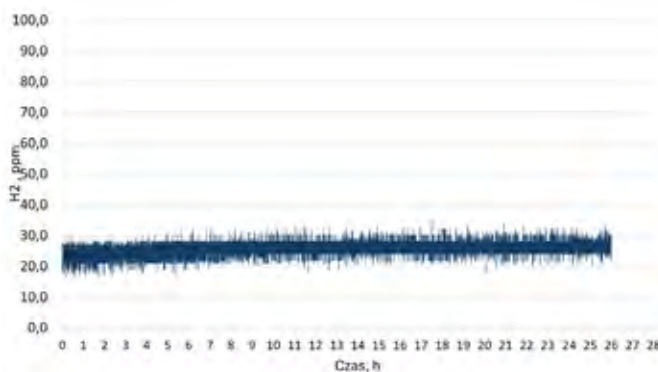
Fig. 6. View of the second-generation test rig. The test section of the pipeline is located inside the chamber and is not visible from the outside

z czynnej sieci. Próbnny pomiar, mający na celu sprawdzenie działania stanowiska, wykonano na dla azotu N_2 , a następnie wodoru H_2 przy ciśnieniu roboczym > 300 kPa. Wyniki przedstawiono poniżej.

Tabela 2. Opis próby nr 1

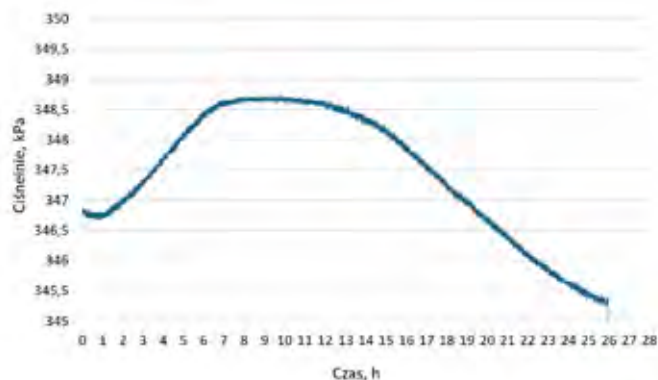
Table 2. Description of test No. 1

Rodzaj próbki	Połączenie kołnierzowe DN 150
Uszczelnienie	Uszczelka kryngelitowa $g = 4$ mm
Medium	Gaz N_2
Data próby	26.05.2025
Czas trwania próby	26 h



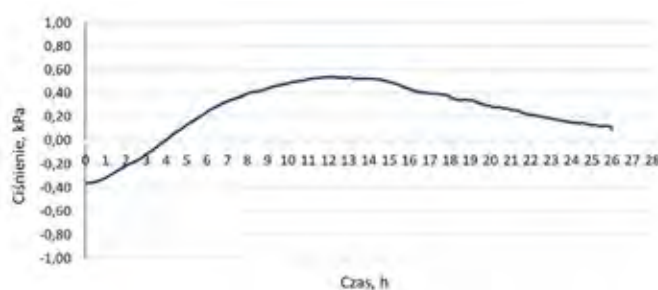
Rys. 7. Koncentracja H_2 w komorze w trakcie próby nr 1, gaz: 100 % azot

Fig. 7. H_2 concentration in the chamber during test no. 1, gas: 100% nitrogen



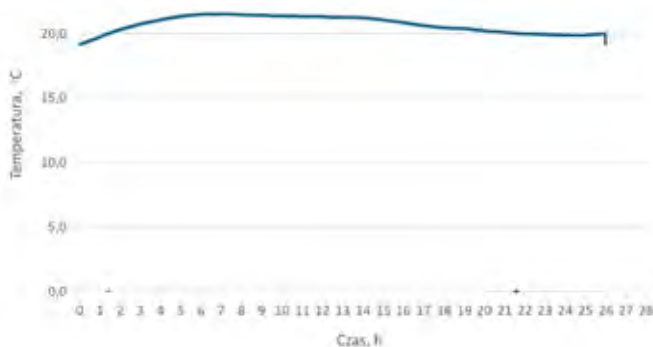
Rys. 8. Ciśnienie w odcinku testowym w trakcie próby nr 1, gaz: 100 % azot

Fig. 8. Pressure in the test section during test no. 1, gas: 100% nitrogen



Rys. 9. Ciśnienie w komorze badawczej w trakcie próby nr 1, gaz: 100 % azot

Fig. 9. Pressure in the test chamber during test no. 1, gas: 100% nitrogen



Rys. 10. Temperatura w komorze badawczej w trakcie próby nr 1, gaz: 100 % azot

Fig. 10. Temperature in the test chamber during test no. 1, gas: 100% nitrogen

Przebieg próby badawczej N_2 i interpretacja wyników

Ciśnienie w elemencie badanym na początku próby łagodnie wzrastało od 346,5 kPa do 348,6 kPa, następnie przez ok 4 h utrzymywało się na stałym poziomie po czym spadło do poziomu 345,25 kPa. Również w komorze badawczej zaobserwowano niewielkie wahania nadciśnienia. Analizując pomiar temperatury można stwierdzić, że zachodzi korelacja temperatury i ciśnienia. Niewielkie wahania ciśnienia w odcinku testowym oraz w komorze badawczej wynikają z różnic temperatury, co wskazuje, że komora jest szczelna. Równoczesny pomiar cząstek wodoru nie wykazuje jego stężenia, zaobserwowane na rys. 7 wartości oscylujące pomiędzy 0 – 25 ppm to efekt szumu pomiarowego czujnika.

Wnioski z próby

Układ pomiarowy zachowuje się prawidłowo. Niewielkie zmiany ciśnienia są naturalnym zjawiskiem, wynikającym z korelacji ciśnienia i temperatury (równania stanu gazu). Należy zwrócić uwagę na szum sygnału czujnika H_2 , wskazującego niewielką koncentrację wodoru, mimo fizycznego braku tego nośnika. Uznano, że stanowisko jest gotowe do dalszych badań.

Tabela 3. Opis próby nr 2

Table 3. Description of test No. 2

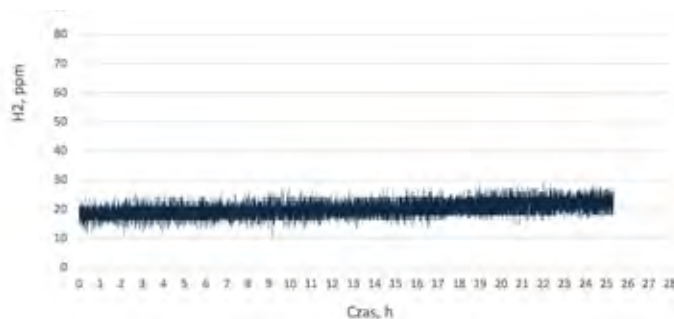
Rodzaj próbki	Połączenie kołnierzowe DN 150
Uszczelnienie	Uszczelka kryngelitowa $g = 4$ mm
Medium	Gaz H_2
Data próby	24.05.2025
Czas trwania próby	24 h

Przebieg próby badawczej H_2 i interpretacja wyników

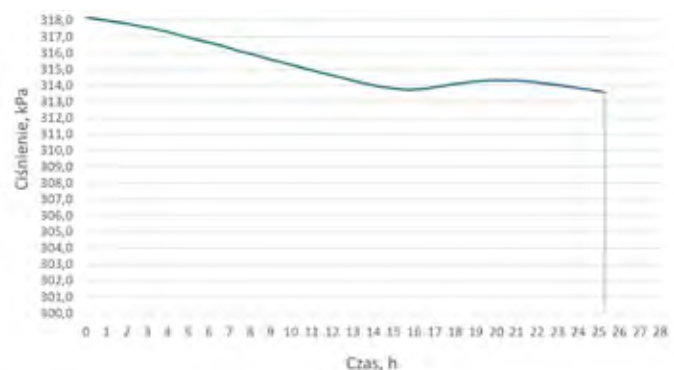
Ciśnienie w elemencie badanym na początku próby wynosiło 318,2 kPa, następnie powoli spadało przez okres 15 h, aż do poziomu 313,8 kPa. Pomiędzy 15 a 23 godziną pomiaru wystąpiły nieznaczne wahania ciśnienia, obejmujące wzrost o około 0,2 kPa. Analizując wykres z równoczesnym pomiarem temperatury ponownie widać, że zachodzi korelacja temperatury i ciśnienia. Obserwacja stężenia wodoru (rys. 11), pomimo szumów pomiarowych, wskazuje na powolny, ale zauważalny wzrost stężenia w czasie badania [11] od średniej wartości ok. 20 ppm na początku próby do 30 ppm na jej końcu. Może to wskazywać na powolną migrację wodoru do komory, jednak aby to jednoznacznie potwierdzić należy badania kilkakrotnie powtórzyć przy różnych parametrach ciśnienia w elemencie badanym.

Wnioski z próby

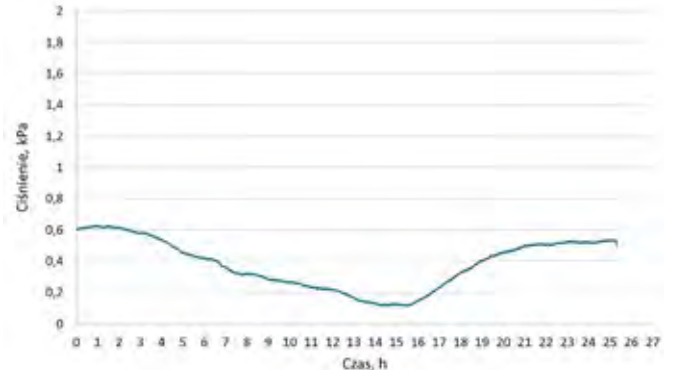
Po przeanalizowaniu pomiarów można stwierdzić, że w elemencie badanym występuje nieznaczny spadek ciśnienia, a w komorze nieznaczny przyrost stężenia wodoru, zgodnie z oczekiwaniem wywołany dyfuzją wodoru przez próbkę. Ponadto, zmiany ciśnienia w elemencie badanym są także skorelowane z temperaturą. Obserwowany spadek ciśnienia w próbce oraz wzrost ciśnienia w komorze jest zgodny z dyfuzją



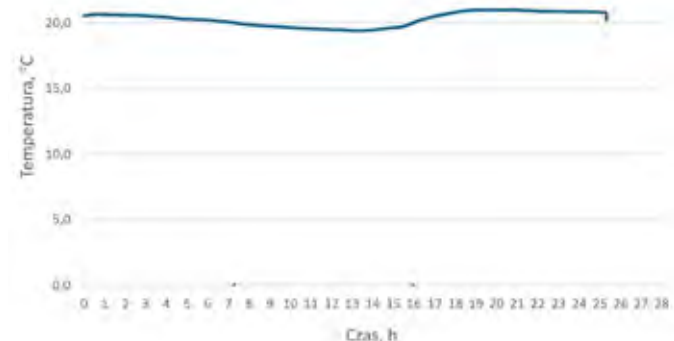
Rys. 11. Koncentracja H_2 w komorze w trakcie próby nr 2, gaz: 100 % wodór
Fig. 11. H_2 concentration in the chamber during test no. 2, gas: 100% hydrogen



Rys. 12. Ciśnienie w odcinku testowym w trakcie próby nr 2, gaz: 100 % wodór
Fig. 12. Pressure in the test section during test no. 2, gas: 100% hydrogen



Rys. 13. Ciśnienie w komorze badawczej w trakcie próby nr 2, gaz: 100 % wodór
Fig. 13. Pressure in the test chamber during test no. 2, gas: 100% hydrogen



Rys. 14. Temperatura w komorze badawczej w trakcie próby nr 2, gaz: 100 % wodór
Fig. 14. Temperature in the test chamber during test no. 2, gas: 100% hydrogen

wodoru przez próbkę. Nie występują anomalie wskazujące na większe nieszczelności ani błędy pomiarowe.

Przenikanie wodoru może zachodzić w sposób kontrolowany i zgodny z procesem dyfuzji przy określonym gradiencie ciśnień. Jednak aby to potwierdzić należy wykonać kilka prób dla zadanych zmiennych parametrów ciśnienia. Wyniki zostaną przedstawione w kolejnej publikacji.

4. Podsumowanie

W ramach dotychczasowych badań skonstruowano dwa stanowiska do badania bezpieczeństwa dystrybucji wodoru. Stanowisko pierwszej generacji ukierunkowane było na badanie procesu dyfuzji przez materiał, jednak bardzo mała skala procesu dyfuzji nie pozwalała na precyzyjny pomiar przy użyciu prostej konstrukcji stanowiska. Do badania procesu dyfuzji przez konkretny materiał, konieczne jest wykorzystanie wyspecjalizowanych stanowisk, przy czym istotną trudnością pozostaje odpowiednie przygotowanie próbki.

W stanowisku II generacji skupiono się na procesie przenikania wodoru przez różnego rodzaju połączenia stosowane w gazownictwie, gdyż to w tych miejscach należy się spodziewać znaczącej dyfuzji. W ramach badań testowych przebadano połączenie kołnierzone z uszczelnieniem klingerytowym, powszechnie stosowanym w łączeniu armatury w sieciach i instalacjach gazowych. Uszczelka stanowi barierę działającą w poprzek kołnierza, przez co grubość dla dyfuzji jest znacznie większa niż grubość uszczelki.

Wstępne wyniki z pomiarów testowych potwierdzają występowanie dyfuzji, jednak ich ilościowe oszacowanie wymaga wielokrotnego powtórzenia badań przy różnych parametrach zadanych. Wyniki potwierdzają prawidłowość wykonania stanowiska badawczego i dają perspektywę rozwojową do ich dalszego prowadzenia w następujących kierunkach:

- 1. Rozszerzenie zakresu ciśnień:** Badania zostaną uzupełnione o testy w szerszym zakresie ciśnień (do 0,6 MPa), co umożliwi lepsze odwzorowanie warunków przemysłowych.
- 2. Porównanie różnych materiałów barierowych.** Planowane jest zastosowanie próbek wykonanych z połączeń zarówno nowych jak i po wieloletniej eksploatacji, rozłącznych i stałych, a także wrażliwych urządzeń stosowanych na sieciach gazowych takich jak kompensatory czy trójniki siodłowe PE.
- 3. Określenie współczynnika przenikalności.** Na podstawie znanego kształtu i wymiarów próbki, możliwe będzie wyznaczenie wartości współczynnika przenikalności wodoru w warunkach zbliżonych do rzeczywistych dla niektórych elementów, jak np. uszczelki.
- 4. Weryfikacja długookresowej stabilności dla połączeń zdjętych z czynnej sieci.** Dłuższe serie pomiarowe pozwolą ocenić stabilność procesu i wpływ czynników takich jak starzenie się materiału, zmiany strukturalne czy powstawanie mikropęknięć.

Część badań (1-3) może być wykonana w ciągu jednego roku, natomiast punkt 4 wymaga badań długookresowych, jednak również istotnych dla bezpieczeństwa eksploatacji sieci.

LITERATURA:

- [1] Dodds, P. E., & Demoullin, S. 2013. "Conversion of the UK gas system to transport hydrogen". *international journal of hydrogen energy*, 38(18):7189-7200.
- [2] Gaykema, E. W., Skryabin, I., Prest, J., & Hansen, B. 2021. „Assessing the viability of the ACT natural gas distribution network for reuse as a hydrogen distribution network”. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(23):12280-12289.
- [3] Huszał, A., & Jaworski, J. 2020. "Studies of the Impact of Hydrogen on the Stability of Gaseous Mixtures of THT". *Energies*, 13(23), 6441.
- [4] Jaworski, J., Kukulska-Zajac, E., & Kułaga, P. 2019. „Wybrane zagadnienia dotyczące wpływu dodatku wodoru do gazu ziemnego na elementy systemu gazowniczego”. *Nafta-Gaz*, 75(10): 625-632.
- [5] Mouli-Castillo, J., Haszeldine, S. R., Kinsella, K., Wheeldon, M., & McIntosh, A. 2021. "A quantitative risk assessment of a domestic property connected to a hydrogen distribution network". *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(29): 16217-16231.
- [6] Muhlbaier, W. K. 2013. „Zarządzanie ryzykiem w eksploatacji rurociągów”. *Fluid Systems*.
- [7] Nykyforchyn, H., Unigovskiy, L., Zvirko, O., Tsyrlunyk, O., & Krechkovska, H. 2021. „Pipeline durability and integrity issues at hydrogen transport via natural gas distribution network”. *Procedia Structural Integrity*, (33): 646-651.