

Badania szczelności połączeń sieci dystrybucyjnej w aspekcie wykorzystania wodoru – część II: wyniki badań

Tightness testing of distribution network connections in terms of hydrogen use – part II: experimental results

Marcin Krocze^{1,3}, Gabriel Malanowski² , Wojciech Kostowski³ 

¹ Polska Spółka Gazownictwa

² Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki, Politechnika Śląska

³ Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Śląska

* Kontakt / Correspondence: wojciech.kostowski@polsl.pl

Streszczenie:

Artykuł jest kontynuacją części I, w której omówiono budowę stanowiska do badania szczelności elementów infrastruktury dystrybucji gazu ziemnego pod kątem zastosowania wodoru. W obecnej, II części zaprezentowano wyniki badań dla 2 kompensatorów dławicowych DN150 po ich wieloletniej eksploatacji. Czujnik elektrochemiczny wykrył dyfuzję wodoru przez uszczelnienia w sposób jednoznaczny i powtarzalny. Równocześnie stwierdzono, że sam pomiar ciśnienia nie jest wystarczający do precyzyjnej oceny szczelności wodorowej. Stwierdzono znaczną, ponad 10-krotną różnicę w szczelności wodorowej pomiędzy badanymi elementami. Ponadto zaobserwowano zjawisko akumulacji wodoru w materiałach uszczelnieniowych, powodujące opóźnione uwalnianie wodoru mimo jego usunięcia z badanego elementu.

Słowa kluczowe: wódór, dyfuzja, sieci gazowe, nieszczelność

Abstract:

This paper is a continuation of Part I, which presented the design of a test rig for investigating the leak tightness of natural gas distribution infrastructure components in the context of hydrogen blending. In Part II, results of leakage tests performed on two DN150 pipeline expansion joints after their long-term operation are presented. For both tested elements, an electrochemical hydrogen sensor enabled a clear and repeatable detection of hydrogen permeation through the sealing system. At the same time, it was demonstrated that pressure measurements alone are insufficient for an accurate assessment of hydrogen leak tightness. The tested expansion joints exhibited a more than tenfold difference in hydrogen tightness. Furthermore, hydrogen accumulation within the sealing materials was observed, resulting in delayed hydrogen release even after the gas had been removed from the tested element.

Keywords: hydrogen, diffusion, distribution, leak

Wykaz oznaczeń

n	– ilość substancji, mol
p	– ciśnienie, kPa
R	– stała gazowa, J/(mol·K)
T	– temperatura, °C
u	– niepewność ($k = 1$), dla ciśnienia kPa
U	– niepewność rozszerzona ($k = 2$), dla ciśnienia, kPa
V	– objętość, m ³
x	– udział molowy, ppm
σ	– odchylenie standardowe, dla ciśnienia kPa

Indeksy:

1	– początek pomiaru
2	– koniec pomiaru
Kreska nad symbolem np. $\bar{p}$ oznacza średnią z serii pomiarów	

1. Wstęp

W ostatnich latach istotnego znaczenia nabiera możliwość wykorzystania istniejącej infrastruktury gazowej w procesie transformacji energetycznej, w szczególności w kontekście integracji odnawialnych źródeł energii. Sieci gazowe rozpatrywane są jako potencjalna infrastruktura do transportu oraz magazynowania wodoru, produkowanego m.in. w procesach elektrolizy zasilanej energią pochodzącą z OZE, zwłaszcza w sytuacji braku możliwości innego zagospodarowania.

Jednocześnie implementacja wodoru w istniejących systemach gazowych wiąże się z szeregiem wyzwań technicznych i materiałowych. Wodór, ze względu na swoje właściwości fizykochemiczne, takie jak mała cząsteczka, wysoka dyfuzyjność oraz zdolność do powodowania kruchości wodorowej materiałów, stawia szczególne wymagania wobec elementów infrastruktury, w tym kompensatorów dławicowych oraz połączeń rozłącznych. Kluczowe staje się zatem określenie ich szczelności, odporności materiałowej oraz długoterminowej trwałości w warunkach pracy z mieszaninami gazu ziemnego i wodoru lub czystym wodorem.

Istotnym aspektem eksploatacji sieci i instalacji gazowych jest również analiza ryzyka związanego z występowaniem nieszczelności. Wycieki gazu, niezależnie od ich skali, mogą prowadzić do poważnych konsekwencji, takich jak zagrożenie wybuchem, emisja gazów cieplarnianych czy straty energetyczne. W przypadku wodoru ryzyko to dodatkowo wzrasta ze względu na jego szeroki zakres palności oraz wysoką przenikalność. Dlatego konieczne jest systematyczne podejście do identyfikacji zagrożeń, szacowania ryzyka oraz jego oceny w oparciu o metody ilościowe i jakościowe, takie jak analiza FMEA (*Failure Modes and Effects Analysis*, [4]), HAZOP (*Hazard and Operability Study*, [2]) czy podejście oparte na wskaźnikach niezawodności.

Minimalizacja ryzyka wymaga wdrożenia kompleksowych działań dotyczących materiałów i konstrukcji uszczelnień oraz procedur eksploatacyjnych. Szczególnie istotne jest zarządzanie ryzykiem w przypadku transportu domieszek wodoru istniejącą infrastrukturą dystrybucyjną, projektowaną do średnio- i niskociśnieniowej dystrybucji gazu ziemnego. W tym wypadku ryzyko jest związane z elementami podatnymi na dyfuzję wodoru, takimi jak uszczelnienia połączeń kołnierzowych oraz gwintowych a zwłaszcza kompensatory dławicowe, licznie występujące w systemie dystrybucyjnym w obszarach eksploatacji górniczej węgla i miedzi oraz na innych terenach niestabilnych.

O ile aspekty materiałowe dotyczące gazociągów do transportu wodoru są szeroko badane i znane w literaturze [1], to literatura dotycząca szczelności połączeń jest stosunkowo ograniczona. Zheng z zespołem [7] badali wpływ wodoru na uszczelnienia gumowe w wysokociśnieniowej infrastrukturze przesyłowej, stwierdzając m.in., że nie jest jeszcze znany wpływ degradacji czasowej na uszczelnienia. Zhou z zespołem [8] badali szczegółowy mechanizm fizyczny dyfuzji przez gumowe materiały uszczelnieniowe. W Polsce prace dotyczące szczelności wybranych połączeń mechanicznych sieci i instalacji gazowych w aspekcie dodatku wodoru prowadził Instytut Nafty i Gazu, stwierdzając brak nieszczelności przy dodatku 15% wodoru [6].

Niniejszy artykuł koncentruje się na szczególnie podatnych na nieszczelności, a nie badanych dotąd elementach, jakimi są kompensatory dławicowe. Artykuł stanowi kontynuację badań

opisanych w części I [3], w której zaprezentowano koncepcję, budowę oraz uruchomienie stanowiska badawczego II generacji. W przedstawionych badaniach wykorzystano to samo stanowisko, wzbogacone o rozwiązania wynikające z doświadczeń zdobytych podczas pierwszego etapu prac, obejmujące optymalizację toru pomiarowego oraz doprecyzowanie procedury badawczej. Pozwoliło to na zwiększenie dokładności i powtarzalności pomiarów, których wyniki zaprezentowano w niniejszym artykule w sposób możliwie kompletny, dokonując koniecznych skrótów redakcyjnych. Kolejnym etapem prowadzonych badań będzie wyznaczenie efektywnego współczynnika dyfuzji oraz ilościowa ocena strat wodoru w odniesieniu do elementów sieci dystrybucyjnej. Wyniki tych badań planuje się przedstawić w odrębnej publikacji.

2. Metodyka badań

Badania przeprowadzono na dwóch eksploatowanych kompensatorach dławicowych DN150 PN16 (rys. 1) z wykorzystaniem stanowiska badawczego II generacji, opisanego szczegółowo w części I pracy [3]. Kompensator nr 1 zabudowano w r. 1972 i był eksploatowany na sieci średniego ciśnienia, natomiast kompensator nr 2 zabudowano w r. 1987 i był eksploatowany na sieci niskiego ciśnienia. Oba urządzenia eksploatowano na gazie koksowniczym do roku 1993, następnie do 2025 na gazie ziemnym.

Celem badań było sprawdzenie, czy badane elementy zachowują szczelność lub też stwarzają ryzyko w przypadku ich zastosowania na wodorze, w szczególności określenie intensywności przenikania wodoru do otoczenia. W tym celu napełniano je wodorem pod ciśnieniem nie mniejszym niż 400 kPa, a stężenie wodoru mierzono w uszczelnionej komorze wypełnionej azotem. Sposób przeprowadzenia próby odpowiada próbie ciśnieniowej gazociągu wg ST-IGG 0902:2025 [5]. Aby stwierdzić, czy wodór przedostaje się do komory, realizowano pomiar elektrochemiczny koncentracji wodoru w ppm, oraz rejestrację ciśnienia i temperatury w elemencie i komorze.

Przed każdą serią pomiarową weryfikowano szczelność badanego elementu oraz całego układu pomiarowego. Pomiary prowadzono przy ciśnieniu przekraczającym 400 kPa; każda próba obejmowała 4-godzinny okres stabilizacji oraz 24-godzinny okres rejestracji. Rejestrowano stężenie wodoru w komorze pomiarowej oraz ciśnienie i temperaturę w elemencie i w komorze.



Rys. 1. Obiekt badany nr 1: Kompensator DN150 PN16

Źródło: opracowanie własne

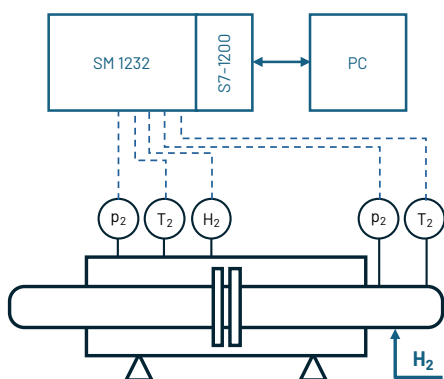
Fig. 1. Tested object: Pipeline expansion joint DN150 PN16

Source: authors' own study

Pomiar stężenia wodoru w komorze badawczej H₂ zrealizowano przy użyciu czujnika ProGas 4 firmy AtestGaz wyposażonego w moduł elektrochemiczny. Urządzenie to charakteryzuje się

zakresem pomiarowym 0–1000 ppm oraz sprzętową kompensacją wpływu temperatury otoczenia. Niepewność pomiaru nie została zadeklarowana przez producenta. Czujnik wykorzystano w trybie pracy *source*, a funkcja konwersji sygnału analogowego 4–20 mA na wielkość pomiarową x_{H_2} (ppm) obejmowała dodatkowe kodowanie stanów czujnika takich jak np. 2 mA – awaria krytyczna, 22 mA – przeciążenie gazowe.

Do pomiaru temperatury w kompensatorze T1, °C oraz komorze badawczej T2, °C zastosowano czujniki rezystancyjne Introl® IT-CF1-Pt100/B/3-PKS-3-50-G1/4 wykorzystujące termorezystor platynowy Pt100, których zmiana oporności przetwarzana była przez przetworniki temperatury INOR® APAQ-R130. Parametry ciśnienia monitorowano za pomocą przetworników JUMO® dTRANS p30, dobranych odpowiednio do zakresów: p_1 : 0–6 bar dla elementu badanego (kompensatora) oraz p_2 : 0–0,25 bar dla komory badawczej. Standardem transmisji dla wszystkich sygnałów procesowych w systemie była analogowa pętla prądowa 4–20 mA. Sygnały te doprowadzono do modułu rozszerzeń wejść analogowych SIEMENS® SM 1231 współpracującego ze sterownikiem PLC. Akwizycja danych odbywała się z okresem próbkowania $t_s = 12$ s, a zgromadzone dane przesyłano do nadrzędnej stacji inżynierskiej. Schemat systemu pomiarowego wraz z wyszczególnionymi sygnałami pomiarowymi oraz ideowym zaprezentowaniem elementów układu przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Schemat ideowy systemu pomiarowego z wyszczególnionymi wielkościami mierzonymi, stacją inżynierską (PC), sterownikiem PLC (S7-1200) oraz modułem wejść analogowych (SM 1231). Źródło: opracowanie własne

Fig. 2. Schematic diagram of the measurement system with the measured quantities, engineering workstation (PC), PLC controller (S7-1200), and analog input module (SM 1231). Source: authors' own study

W przypadku pomiaru ciśnienia wyznaczono niepewność pomiarową typu B, której źródłem były parametry metrologiczne deklarowane przez producenta przetworników ciśnienia. Za źródło niepewności przyjęto odchylenie charakterystyki wynoszące $\pm 0,5\%$ końcowej wartości zakresu pomiarowego. Przy założeniu prostokątnego rozkładu prawdopodobieństwa standardowa niepewność dla przetwornika FS = 600 kPa wyniosła:

$$u_B = \frac{a}{\sqrt{3}}; \quad a = 6 \text{ kPa}; \quad u_B = 1,73 \text{ kPa}$$

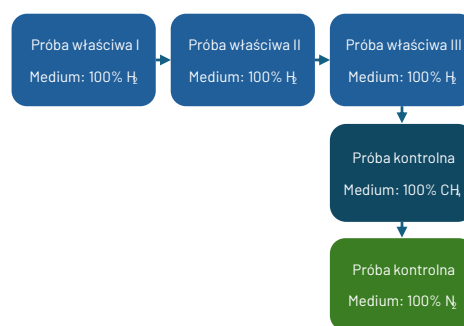
Analogicznie, dla przetwornika FS = 25 kPa otrzymano $u_B = 0,072$ kPa. Wartości te porównano ze zmianami ciśnienia w trakcie badań, traktowanymi jak losowa próba.

2.1. Plan badań

W przypadku pierwszego kompensatora badania prowadzono zgodnie z następującą sekwencją:

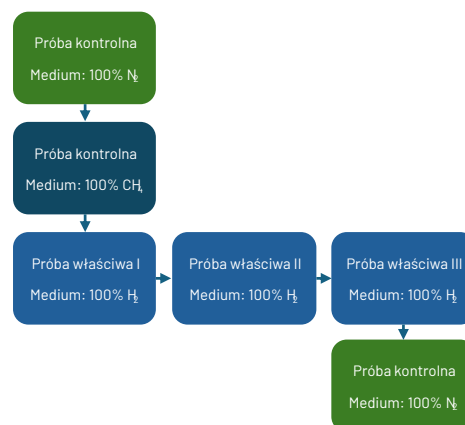
- 100% wodór – główna próba badawcza obejmująca 3 powtórzeń badania,
- 100% azot – próba kontrolna z wykorzystaniem gazu obojętnego,
- 100% gaz ziemny (metan) – próba z wykorzystaniem medium eksploatacyjnego.

W drugim kompensatorze zachowano taki sam sposób przygotowania elementu i stanowiska, zmieniając jedynie kolejność podawanych gazów w celu oceny wpływu sekwencji badań na charakter uzyskiwanych wyników. W każdym wypadku pomiędzy próbami zachowywano odstęp 24 h wraz z przedmuchaniem komory i elementu badanego azotem. Kolejności badań w poszczególnych cyklach przedstawiono na rys. 3 i 4.



Rys. 3. Sekwencja badań dla pierwszego elementu badanego
Źródło: opracowanie własne

Fig. 3. Design of experiments for the 1st tested element. Source: authors' own study



Rys. 4. Rozszerzona sekwencja badań dla drugiego elementu badanego. Źródło: opracowanie własne

Fig. 4. Extended design of experiments for the 2nd tested element. Source: authors' own study

3. Wyniki badań

3.1. Cykl I badań – element badany nr 1

3.1.1. Pomiar zasadniczy: 3 cykle napełniania wodorem.

Dla I cyklu badań wykonano trzy próby napełnienia elementu badanego czystym wodorem (tabela 1, rys. 5).

Tabela 1. Zestawienie wyników pomiaru dla I cyklu badań.

E – element badany: kompensator nr 1 DN150 PN16,

K – komora, opracowanie własne

Table 1. Summary of experimental results for the 1st cycle:

E – tested element (expansion joint DN150 PN16),

K – testing chamber, own elaboration

Wielkość	Jedn.	Próba 1		Próba 2		Próba 3	
		E	K	E	K	E	K
$x_{H_2,1}$	ppm		67,13		77,94		28,97
$x_{H_2,2}$	ppm		79,43		89,19		57,54
$x_{H_2,2} - x_{H_2,1}$	ppm		+12,30		+11,25		+28,57
$x_{H_2,max}$	ppm		84,382		95,595		60,80
$x_{H_2,min}$	ppm		60,800		73,315		24,70
p_1	kPa	414,11	101,31	414,50	101,55	427,76	101,41
p_2	kPa	414,93	101,62	415,17	101,75	427,30	101,18
$\frac{p_2 - p_1}{\bar{p}}$	%	+0,2%	+0,3%	+0,16%	+0,19%	-0,11%	-0,22%
p_{max}	kPa	416,67	101,38	416,45	102,12	428,82	101,57
p_{min}	kPa	412,59	101,09	412,87	101,40	426,43	100,96
$\bar{p}$	kPa	414,61	101,28	414,77	101,74	427,66	101,27
$\frac{p_{max} - p_{min}}{\bar{p}}$	%	1,0%	0,9%	0,9%	0,7%	0,6%	0,6%
$\sigma(p_i)$	kPa	1,394	0,314	1,186	0,245	1,186	0,245
$u_B(p)$	kPa	1,73	0,072	1,73	0,072	1,73	0,072
V	m ³	0,038	0,096	0,038	0,096	0,038	0,096
T_1	K	290,9	290,9	291,2	291,2	293,5	293,5
n_1	mol	6,506	4,021	6,507	4,027	6,661	3,989
T_2	K	291,5	291,5	291,7	291,7	293,6	293,6
n_2	mol	6,506	4,025	6,506	4,028	6,652	3,979
Δn	mol	0,000	+0,004	-0,001	+0,001	-0,009	-0,010

We wszystkich trzech próbach pomimo szumu pomiarowego zauważalnego na rys. 5 stwierdzono niewielki, ale systematyczny wzrost stężenia wodoru w czasie, największy dla próby nr 3. Są to we wszystkich przypadkach wielkości bardzo małe. Najwyższe zmierzone wartości stężenia po 1 dobie próby wynoszą ok. 90 ppm, co stanowi zaledwie ok. 0,2% dolnej granicy wybuchowości wodoru w powietrzu (4%). Wzrost ma charakter monotoniczny, co wskazuje, że wodór sukcesywnie przedostaje się z elementu badanego do komory pomiarowej.

Wyniki dotyczące ciśnień i temperatury wskazują, że w tak małym zakresie różnic stężeń oraz przy tak małej migracji wodoru nie jest możliwe jej stwierdzenie na drodze pomiarów parametrów stanu gazu, gdyż zjawisko ma zbyt małą skalę, po drugie występuje zauważalna korelacja zwłaszcza ciśnienia w komorze badawczej i temperatury (tabela 2). Wzrost ciśnienia w komorze jest więc związany ze wzrostem temperatury, a nie przyrostem ilości gazu w wyniku migracji wodoru, który jest pomijalny. Podobnie dla elementu badawczego: dla próby 2 odnotowano nieznaczny przyrost ilości gazu, co oznacza, że ubytek wodoru jest mniejszy niż niepewność wyliczenia ilości gazu w oparciu o pomiary ciśnienia i temperatury.

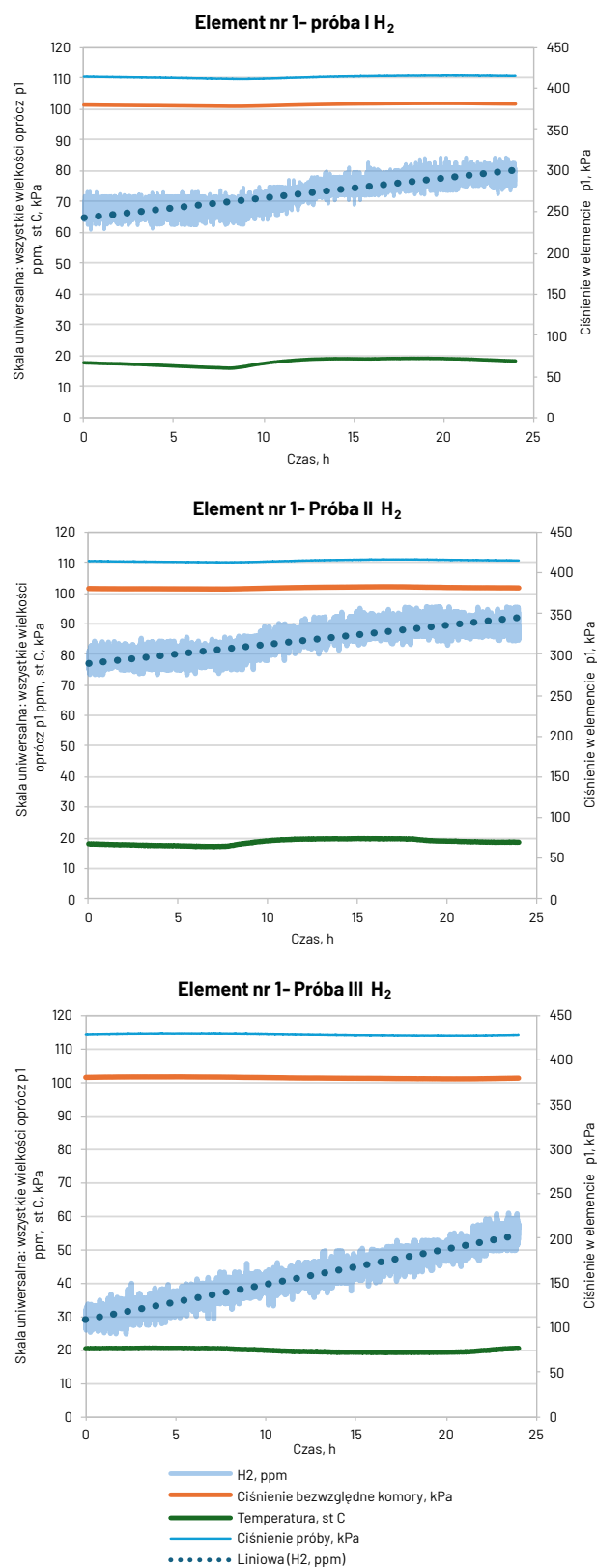
**Rys. 5.** Rejestracja wybranych parametrów podczas prób dla wodoru. Element badany nr 1**Fig. 5.** Registration of selected parameters during hydrogen tests. Tested element No. 1

Tabela 2. Współczynniki korelacji wybranych wielkości mierzonych. Element badany nr 1
Table 2. Correlation factors for selected measured quantities. Tested element No. 1

Współczynnik korelacji	Próba 1	Próba 2	Próba 3
Ciśnienia i temperatury komory	0,928	0,948	0,98
Ciśnienia komory i ciśnienia elementu	0,969	0,953	0,86
Ciśnienia i temperatury elementu	0,846	0,844	0,80

3.1.2. Pomiary kontrolne 100% CH₄ oraz 100% N₂

Po zakończeniu pomiaru zasadniczego wykonano dwa pomiary kontrolne polegające na napełnieniu elementu badanego czystym metanem oraz czystym azotem (každorazowo po uprzednim przedmuchiowaniu oraz postoju 24 h). Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 3, a przebieg rejestrowanych parametrów na rys. 6.

Tabela 3. Stężenie wodoru w komorze badawczej podczas prób kontrolnych wykonanych po próbach zasadniczych. Element badany nr 1

Table 3. Hydrogen concentration in the testing chamber during control tests performed following the main test series. Tested element No. 1

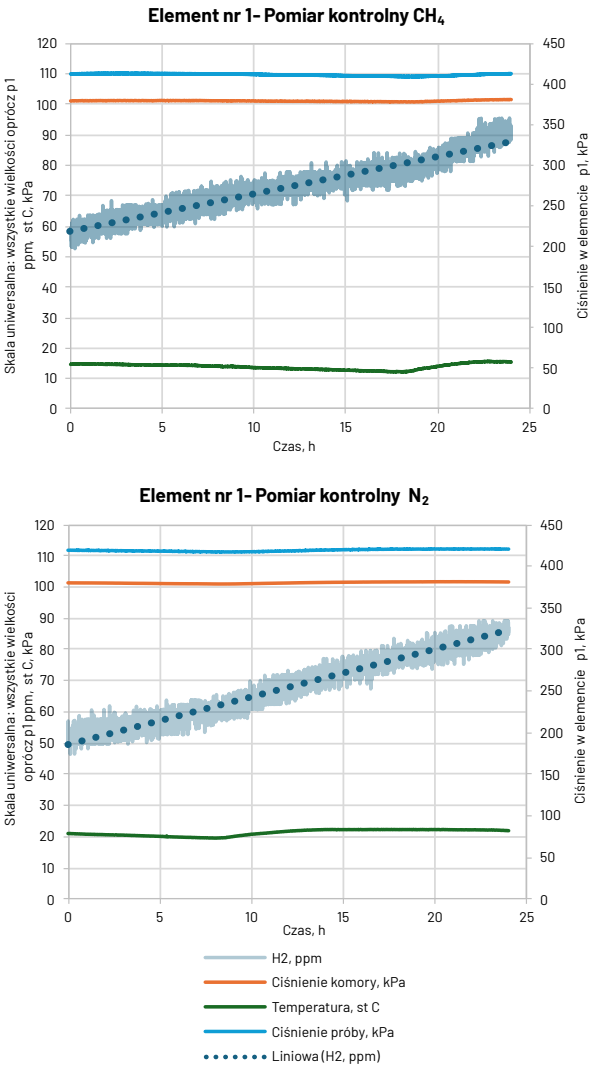
Wielkość	Jedn.	Próba CH ₄	Próba N ₂
$\chi_{H2,1}$	ppm	59,14	53,24
$\chi_{H2,2}$	ppm	89,16	84,89
$\chi_{H2,2} - \chi_{H2,1}$	ppm	30,02	31,65
$\chi_{H2,max}$	ppm	95,56	89,23
$\chi_{H2,min}$	ppm	52,66	46,41

Analiza wyników próby z wykorzystaniem metanu oraz azotu wskazuje na utrzymywanie się podwyższonego poziomu wodoru oraz jego stały wzrost w komorze badawczej pomimo braku wodoru wewnątrz badanego elementu oraz pomimo przedmuchiwania komory azotem pomiędzy próbami. Rejestrowana obecność wodoru wskazuje na występowanie procesu desorpcji wodoru zaabsorbowanego podczas prób zasadniczych. Oznacza to, że materiały tworzące kompensator wykazują zdolność czasowego magazynowania wodoru, który następnie jest stopniowo uwalniany do przestrzeni komory badawczej. Najbardziej prawdopodobnymi miejscami retencji wodoru są struktura uszczelnienia dławicy, przestrzenie międzywarstwowe materiałów uszczelniających, powierzchnie wewnętrzne ścianek rury oraz obszary kontaktu pomiędzy poszczególnymi elementami kompensatora.

3.2. Cykl II badań – element badany nr 2

Z uwagi na zaobserwowaną bezwładność układu oraz akumulację wodoru w materiałach uszczelnieniowych, dla drugiego elementu badawczego zmodyfikowano plan badań. W pierwszej kolejności rozpoczęto od dokonania próby kontrolnej azotem, następnie wykonano kolejną próbę metanem. Dopiero po wy-

konaniu dwóch prób kontrolnych układu przystąpiono do próby głównej napełniając element badawczy wodorem (3 powtórzenia). Na zakończenie wykonano pojedynczą próbę kontrolną azotem.



Rys. 6. Wzrost stężenia wodoru w komorze badawczej w próbach kontrolnych wykonanych po zakończeniu prób zasadniczych. Element badany nr 1

Fig. 6. Increment of hydrogen concentration in the testing chamber in the control tests performed following the main test series. Tested element No. 1

3.2.1. Pomiar kontrolny wstępny 100% N₂ oraz 100% CH₄

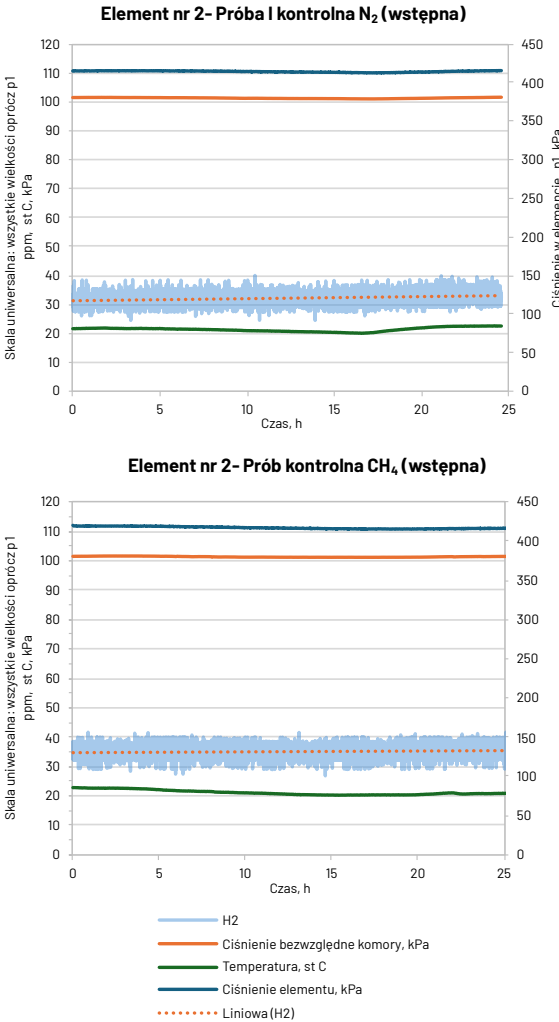
Przed rozpoczęciem pomiaru zasadniczego wykonano dwa pomiary kontrolne polegające na napełnieniu elementu badanego czystym azotem oraz czystym metanem (každorazowo po uprzednim przedmuchiowaniu oraz postoju 24 h). Podobnie jak dla pomiarów zasadniczych, zastosowano ciśnienie próby > 400 kPa, czas próby 24 h oraz czas stabilizacji 4 h. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 4, a przebieg rejestrowanych parametrów na rys. 7.

Tabela 4. Stężenie wodoru w komorze badawczej podczas prób kontrolnych wykonanych przed próbami zasadniczymi.
Element badany nr 2

Table 4. Hydrogen concentration in the testing chamber during control tests preceding the main test series.
Tested element No. 2

Wielkość	Jedn.	Próba N ₂	Próba CH ₄
$\chi_{H_2,1}$	ppm	32,227	38,520
$\chi_{H_2,2}$	ppm	32,227	38,411
$\chi_{H_2,2} - \chi_{H_2,1}$	ppm	0,000	- 0,109
$\chi_{H_2,max}$	ppm	40,003	42,788
$\chi_{H_2,min}$	ppm	24,486	26,837

Wyniki obu prób z wykorzystaniem azotu oraz metanu wskazują na poprawne działanie układu pomiarowego oraz brak wpływu elektrochemicznego azotu oraz metanu na czujnik wodoru. Podczas całego okresu pomiarowego zarejestrowane stężenie wodoru utrzymywało się na praktycznie stałym, resztkowym poziomie, który może być związany z uprzednią eksploatacją czujnika.



Rys. 7. Resztkowe stężenie wodoru w komorze badawczej w próbach kontrolnych wykonanych przed rozpoczęciem prób zasadniczych. Element badany nr 2

Fig. 7. Residual hydrogen concentration in the testing chamber during control tests preceding the main test series. Tested element No. 2

3.2.2. Pomiar zasadniczy: 3 cykle napełniania wodorem

Dla II cyklu badań wykonano trzy próby napełnienia elementu badanego czystym wodorem. Elementem badanym był inny egzemplarz kompensatora dławicowego (nr 2) eksploatowanego uprzednio na sieci dystrybucyjnej. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 5, a przebieg rejestracji parametrów podczas prób na rys. 8.

Tabela 5. Zestawienie wyników pomiaru dla II cyklu badań.
E – element badany: kompensator nr 2 DN150 PN16,
K – komora

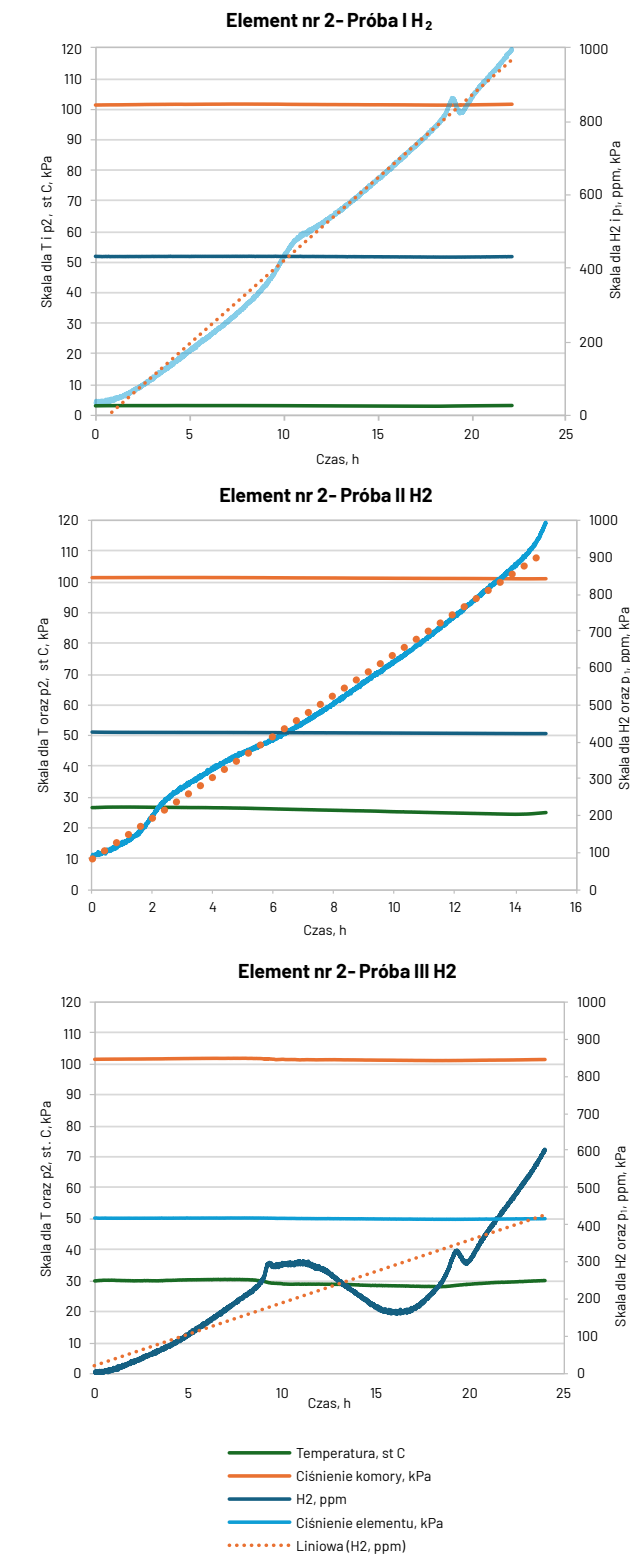
Table 5. Summary of experimental results for the 2nd cycle:
E – tested element (expansion joint No. 2 DN150 PN16),
K – testing chamber

Wielkość	Jedn.	Próba 1		Próba 2		Próba 3	
		E	K	E	K	E	K
$\chi_{H_2,1}$	ppm		32,19		89,88		3,979
$\chi_{H_2,2}$	ppm		997,79		992,59		601,888
$\chi_{H_2,2} - \chi_{H_2,1}$	ppm		965,60		902,71		597,909
$\chi_{H_2,max}$	ppm		998,16		994,83		603,407
$\chi_{H_2,min}$	ppm		30,60		88,65		0,940
p_1	kPa	432,96	101,39	426,26	101,41	418,36	101,43
p_2	kPa	431,97	101,65	422,14	101,06	416,62	101,37
$\frac{p_2 - p_1}{\bar{p}}$	%	-0,2%	+0,3%	-1,0%	-0,3%	-0,4%	-0,1%
p_{max}	kPa	432,96	101,71	426,26	101,46	418,47	101,77
p_{min}	kPa	430,62	101,36	422,03	101,02	414,97	101,02
$\bar{p}$	kPa	431,97	101,55	424,10	101,28	416,86	101,37
$\frac{p_{max} - p_{min}}{\bar{p}}$	%	0,5%	0,3%	1,0%	0,4%	0,8%	0,7%
$\sigma(p_i)$	kPa	0,65	0,10	1,14	0,14	1,18	0,23
$u_B(p)$	kPa	1,73	0,072	1,73	0,072	1,73	0,072
V	m ³	0,038	0,096	0,038	0,096	0,038	0,096
T_1	K	298,7	298,7	299,7	299,7	303,1	303,1
n_1	mol	6,625	3,919	6,500	3,907	6,309	3,864
T_2	K	299,6	299,6	298,1	299,9	303,2	303,2
n_2	mol	6,590	3,918	6,472	3,891	6,281	3,861
Δn	mol	-0,034	0,001	-0,028	-0,015	-0,028	-0,004

Tabela 6. Współczynniki korelacji wybranych wielkości mierzonych. Element badany nr 2

Table 6. Correlation factors for selected measured quantities.
Tested element No. 2

Współczynnik korelacji	Próba 1	Próba 2	Próba 3
Ciśnienia i temperatury komory	0,779	0,990	0,894
Ciśnienia komory i ciśnienia elementu	0,859	0,984	0,894
Ciśnienia i temperatury elementu	0,793	0,986	0,835



Rys. 8. Rejestracja parametrów w cyklu badanym nr 2.
Element badany nr 2
Fig. 8. Registration of parameters in the 2nd cycle.
Tested element No. 2

Wyniki pomiarów znacząco różnią się od I cyklu badań. W każdej z prób zarejestrowano znaczący wzrost stężenia wodoru w komorze badawczej, przy czym w próbie 1 i 2 stężenie zbliżyło się do wartości granicznej 1000 ppm odpowiednio po 22 oraz 15 godzinach, co wymusiło wcześniejsze zakończenie próby.

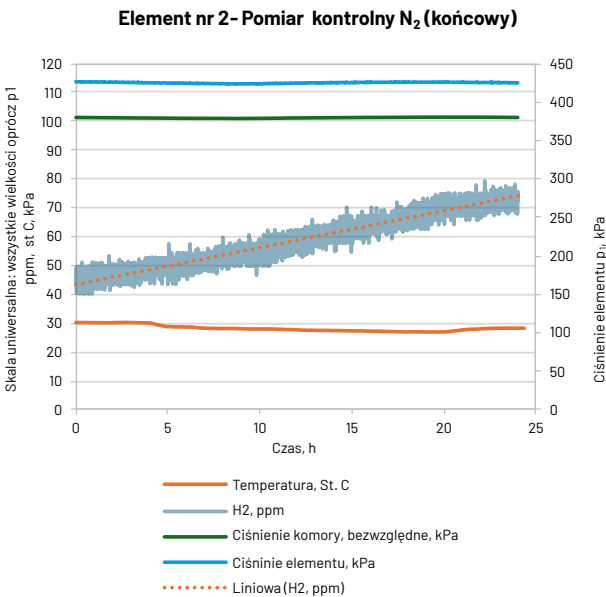
W 3 próbie wzrost stężenia był nieco mniejszy (do 603,4 ppm), ale również o rząd wielkości wyższy niż dla elementu 1. W trakcie wszystkich prób ciśnienie w elemencie badanym, ciśnienie w komorze oraz temperatura pozostawały w zasadzie stabilne, co potwierdza prawidłowy przebieg pomiaru i zachowanie porównywalnych warunków badawczych. Tym niemniej, we wszystkich próbach odnotowano spadek ciśnienia w elemencie od 0,2 do 1%, oraz wyznaczono ubytek molowy wodoru w elemencie, co może świadczyć, że skala transportu wodoru jest na tyle duża, że daje się zaobserwować również na drodze pomiaru ciśnienia. Równocześnie, nie obserwowano jednoznacznego przyrostu ilości gazu w komorze, co związane jest z tym, że szczelność tej komory względem otoczenia nie jest absolutna (manszety uszczelniające), co jednak nie wpływa negatywnie na interpretację wyników.

3.2.3. Pomiar kontrolny 100% N₂

Wyniki pomiaru kontrolnego zrealizowano po pomiarach głównych przedstawiono w tabeli 7 oraz na rys. 9.

Tabela 7. Stężenie wodoru w komorze badawczej podczas próby kontrolnej wykonanej po próbach zasadniczych.
Element badany nr 2
Table 7. Hydrogen concentration in the testing chamber during control tests following the main test series.
Tested element No. 2

Wielkość	Jedn.	Próba N ₂
$\chi_{H2,1}$	ppm	46,477
$\chi_{H2,2}$	ppm	75,051
$\chi_{H2,2} - \chi_{H2,1}$	ppm	28,573
$\chi_{H2,max}$	ppm	79,282
$\chi_{H2,min}$	ppm	40,148



Rys. 9. Wzrost stężenia wodoru w komorze w próbie azotowej, element nr 2 – wynik akumulacji w materiale
Fig. 9. Increment of hydrogen concentration during the final nitrogen test, element No. 2: result of hydrogen accumulation in the tested element material

Po zakończeniu serii prób z wykorzystaniem wodoru wykonano pomiar kontrolny z wykorzystaniem azotu. Podobnie jak dla cyklu I badań, zarejestrowano systematyczny wzrost stężenia wodoru od 40,15 ppm do 79,28 ppm. W przeciwieństwie do wcześniejszych prób kontrolnych wykonanych przed badaniami z wodorem, przebieg zmian wykazywał wyraźną tendencję wzrostową utrzymującą się przez cały okres pomiarowy. Jednocześnie ciśnienie bezwzględne w badanym elemencie utrzymywało się na średnim poziomie 425,0 kPa, natomiast ciśnienie w komorze pozostawało praktycznie niezmiennie i wynosiło około 101,2 kPa. Zmiany ciśnienia w komorze były pomijalnie małe (0,001%), a temperatura utrzymywała się na stabilnym poziomie około 298,6 K, co potwierdza zachowanie porównywalnych warunków prowadzenia pomiaru. Pomimo zastosowania jako medium badawczego wyłącznie azotu, detektor rejestrował stopniowy wzrost stężenia wodoru w komorze badawczej. Potwierdzono zatem zjawisko retencji wodoru w materiałach uszczelnieniowych.

4. Wnioski i plan dalszych badań

Przeprowadzone badania zrealizowane na dwóch wyeksploatowanych obiektach infrastruktury dystrybucyjnej dały interesujące wnioski:

- W obu wypadkach zastosowany układ pomiarowy pozwolił w sposób powtarzalny na detekcję migracji wodoru z badanego elementu do otoczenia.
- W przypadku napełnienia badanego elementu wodorem migracja ta (dyfuzja) zachodzi w każdym przypadku.
- Detekcja wodoru jest możliwa na drodze czujnika elektrochemicznego, natomiast pomiar parametrów stanu (ciśnienie i temperatura) nie jest wystarczający.
- Badane obiekty znacząco różnią się skalą dyfuzji wodoru: różnica koncentracji końcowej wodoru jest ponad 10-krotna.
- Wbrew intuicji, obiektem o gorszej szczelności jest obiekt znacznie nowszy, co może być wynikiem różnych warunków eksploatacji (dynamika terenu i mechanizmu urządzenia), gorszej jakości wykonania elementu 2 lub też wynikiem samoczynnego doszczelnienia elementu 2 w wyniku wieloletniej eksploatacji pod wyższym ciśnieniem niż element 1. Trudno jednak wykluczyć czynnik losowy.
- Zaobserwowano zjawisko retencji wodoru w materiałach, co w praktyce eksploatacji może być źródłem fałszywych, mylących sygnałów w przypadku np. okresowego stosowania wodoru.

- Opracowana metodyka badawcza może zostać zastosowana do oceny innych typów połączeń i uszczelnień występujących w systemie dystrybucji gazu. Dla każdego badanego rozwiązania możliwe jest wyznaczenie efektywnego współczynnika dyfuzji, strumienia przenikania oraz rocznej ilości wodoru migrującej przez dane połączenie. Takie podejście pozwala porównać różne konstrukcje uszczelnień pod względem ich podatności na przenikanie wodoru oraz określić, czy transport czystego wodoru lub mieszanin gazu ziemnego z wodorem może powodować istotne straty gazu albo wpływać na bezpieczeństwo eksploatacji sieci.

5. Literatura

- [1] Islam, A., Alam, T., Sheibley, N., Edmonson, K., Burns, D., & Hernandez, M. (2024). Hydrogen blending in natural gas pipelines: A comprehensive review of material compatibility and safety considerations. *International Journal of Hydrogen Energy*, 93, 1429-1461. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.10.384>
- [2] Kletz, T. 2006. *HAZOP and HAZAN: Identifying and Assessing Process Industry Hazards*. 4th ed. Boca Raton: CRC Press.
- [3] Kroczyk M., Kostowski, W., Kulik, K., (2025). Badania szczelności połączeń sieci dystrybucyjnej w aspekcie wykorzystania wodoru – część I: projekt stanowiska i wstępne wyniki. *Gaz Woda i Technika Sanitarna*, 99(7-8), 14–19. <https://doi.org/10.15199/17.2025.7-8.2>
- [4] Stamatis D. H. 2003. *Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution*. 2nd ed. Milwaukee: ASQ Quality Press
- [5] ST-IGG-0902:2025. *Gazociągi. Próby ciśnieniowe gazociągów stalowych*.
- [6] Szewczyk, P., & Jaworski, J. (2020). Analiza wpływu dodatku wodoru do gazu ziemnego na szczelność połączeń mechanicznych wybranych elementów sieci i instalacji gazowych. *Prace Naukowe Instytutu Nafty i Gazu*. <https://doi.org/10.18668/pn2020.231>
- [7] Zheng, Y., Tan, Y., Zhou, C., Chen, G., Li, J., Liu, Y., ... & Zhang, G. (2020). A review on effect of hydrogen on rubber seals used in the high-pressure hydrogen infrastructure. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(43), 23721-23738. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.069>
- [8] Zhou, C., Huang, Y., Zheng, Y., & Hua, Z. (2024). Hydrogen permeation behavior of rubber sealing materials for hydrogen infrastructure: recent advances and perspectives. *International Journal of Hydrogen Energy*, 59, 742-754. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.042>