

Badania szczelności połączeń sieci dystrybucyjnej w aspekcie wykorzystania wodoru – część III: efektywne współczynniki dyfuzji

Tightness testing of distribution network connections in terms of hydrogen use – part III: effective diffusion coefficients

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 oraz II, w których omówiono budowę stanowiska do badania szczelności elementów infrastruktury dystrybucji gazu ziemnego pod kątem zastosowania wodoru oraz zaprezentowano wyniki badań dla 2 kompensatorów dławicowych DN 150 po ich wieloletniej eksploatacji. Przeanalizowano strukturę uszczelnienia wraz z pomiarami kompresji, a następnie wyznaczono współczynniki dyfuzji. Uzyskane współczynniki wynoszą od ok. $2 \cdot 10^{-11}$ dla elementu nr 1 do $2,5 \cdot 10^{-9}$ m²/s dla elementu nr 2, co jest odpowiednio niższe oraz zgodne z wartościami literaturowymi dla pojedynczego uszczelnienia NBR. Skala strat wodoru dla sieci dystrybucyjnej jest oceniona jako niska, a skala ryzyka jako bardzo niska.

Słowa kluczowe: wodór, dyfuzja, sieci gazowe, dystrybucja, ryzyko, nieszczelność, przenikanie

Abstract:

This paper is a continuation of Part I and II, 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 along with experimental results of leakage tests performed on two DN 150 pipeline expansion joints after their long-term operation. The seal structure was analyzed together with compression measurements, and the diffusion coefficients were determined. The obtained diffusion coefficients ranged from approximately 2×10^{-11} m²/s for element No. 1 to 2.5×10^{-9} m²/s for element No. 2, representing values that are, respectively, lower than and consistent with those reported in the literature for a single NBR seal. The magnitude of hydrogen losses in the gas distribution network was assessed as low, while the associated risk level was evaluated as very low.

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

Wykaz oznaczeń

C	– koncentracja, mol/m ³
D_{eff}	– efektywny współczynnik dyfuzji, m ² /s
J	– gęstość strumienia dyfuzji, mol/(s·m ²)
m	– masa, kg
n	– ilość substancji, mol
$\dot{n}$	– strumień substancji, mol/s
p	– ciśnienie, kPa
R_u	– stała gazowa, J/(mol K)
T	– temperatura, K
V	– objętość, m ³

x	– udział molowy, ppm
τ	– czas, s

Indeksy:

1	– początek pomiaru
2	– koniec pomiaru

Kreska nad symbolem np. $\bar{x}$ oznacza średnią z serii pomiarów

1. Wstęp

W dyskusji o transporcie wodoru sieciami gazowymi zwraca się często uwagę, że z uwagi na małą cząsteczkę wodór jest gazem łatwo ulatniającym się na drodze dyfuzji przez co jego transport może być problematyczny. Z drugiej strony, producenci armatury i urządzeń a także turbin gazowych deklarują przystosowanie swoich produktów do pracy z wodorem. Zachodzi zatem potrzeba kwantyfikacji możliwych nieszczelności na drodze eksperymentalnej, a także określenia czy nieszczelności te mają znaczenie ekonomiczne (straty wodoru) lub mogą wpływać na bezpieczeństwo eksploatacji sieci, instalacji czy odbiorników gazowych z domieszką wodoru.

We wcześniejszych częściach niniejszej publikacji (Część I – projekt stanowiska i wstępne wyniki [4], Część II – badania eksperymentalne [5]) przedstawiono stanowisko badawcze do badania elementów sieci dystrybucyjnej w aspekcie możliwości zastosowania wodoru, przy czym skupiono się na elementach potencjalnie najłagodniejszych pod kątem szczelności, tj. kompensatory szkód górniczych.

W niniejszej, III części publikacji przedstawiono analizę procesu dyfuzji wodoru na podstawie przeprowadzonych pomiarów. Transport gazów, w tym wodoru, przez materiały uszczelniające zachodzi głównie na drodze dyfuzji i rozpuszczania, opisywanych m.in. prawem Ficka. Intensywność tego procesu zależy od struktury materiału, jego porowatości, temperatury, ciśnienia oraz właściwości fizykochemicznych gazów. Wodór jako gaz o najmniejszej cząsteczce, charakteryzuje się bardzo wysoką zdolnością do przenikania przez wiele materiałów, co czyni go szczególnie wymagającym medium z punktu widzenia szczelności.

W praktyce inżynierskiej stosowane są różnorodne materiały uszczelniające, takie jak elastomery (np. guma NBR), materiały włókniste (historycznie azbest), materiały grafitowe oraz kompozytowe materiały uszczelkowe typu klingeryt. Każdy z nich wykazuje odmienną odporność na przenikanie gazów. Materiały elastomerowe cechują się stosunkowo wysoką przepuszczalnością dla wodoru, wynikającą z ich struktury molekularnej, natomiast materiały grafitowe i kompozytowe charakteryzują się lepszą barierowością, szczególnie przy odpowiednim zagęszczeniu i docisku. Z kolei materiały azbestowe, obecnie wycofywane ze względu na szkodliwość, wykazywały specyficzne właściwości uszczelniające wynikające z ich włóknistej struktury.

Kwestie przenikalności i strat gazu są szeroko analizowane na wszystkich etapach łańcucha dostaw, w tym podczas magazynowania i transportu. W przypadku podziemnych magazynów wodoru, Carden i in. [3] analizowali ich szczelność, stwierdzając, że przy zastosowaniu skał pokrywowych jako naturalnej bariery, nieszczelności wynosiły około 2% w skali całego cyklu życia instalacji. Amid i in. [1] poprzez teoretyczną analizę zasugerowali, że w typowych warunkach straty wodoru spowodowane dyfuzją mogą zostać ograniczone do wartości poniżej 0,1%. Podczas analizy całkowitych strat należy uwzględnić również czynniki chemiczne, co wykazali Bo i in. [2]. Badając szczelność piaskowcowych zbiorników magazynowych stwierdzili oni, że w wyniku reakcji z kalcylem w środowisku solankowym całkowite straty wodoru wynoszą od 0,72% do 2,76% w okresie 30 lat eksplo-

atacji. Biorąc pod uwagę szczelność rurociągów przesyłowych oraz sieci dystrybucyjnej Niernann i in. [7], powołując się na dane Departamentu Energii USA (DOE, 2015. *Multi-Year research, development, and demonstration plan: 3. 2015. hydrogen delivery*, 2), przedstawili, że przy wykorzystaniu standardowej infrastruktury nieszczelności wynosiły poniżej 0,5% dla etapu transmisji oraz 0,02% dla etapu dystrybucji. Analizując infrastrukturę niskociśnieniową Mejia i in. [6] wykazali natomiast, że czysty wodór wycieka z instalacji z takim samym tempie jak mieszanina wódor/gaz ziemny, jak również czysty gaz ziemny.

Jak wprowadzono w Części II [5], w literaturze znane są badania dotyczące wpływu wodoru na uszczelnienia gumowe [10], a także badania szczelności wybranych połączeń mechanicznych prowadzone przez Instytut Nafty i Gazu do 15% dodatku wodoru [9]. Szczegółowy mechanizm fizyczny dyfuzji przez materiał został opisany przez Zhou z zespołem [11], który wyznaczył współczynnik dyfuzji na poziomie pomiędzy $1 \cdot 10^{-9}$ a $4 \cdot 10^{-9}$ m²/s dla materiału NBR oraz EPDM, który jednak nie jest stosowany w gazownictwie z uwagi na brak odporności na kontakt z olejami i paliwami węglowodorowymi. Ponadto, autorzy badali nasączenie materiałów uszczelnieniowych wodorem, stwierdzając, że guma NBR (stosowana m.in. w uszczelnieniach kompensatora) adsorbuje nieco mniej wodoru niż materiał EPDM.

Zasadniczym celem niniejszej pracy jest wyznaczenie efektywnego współczynnika dyfuzji oraz ilościowa ocena ryzyka eksploatacyjnego oraz ocena skali strat wodoru w odniesieniu do elementów sieci dystrybucyjnej.

2. Metodyka badań

2.1. Sposób prowadzenia pomiarów

Badania przeprowadzono na dwóch eksploatowanych kompensatorach dławicowych DN 150 PN16 (rys. 1) z wykorzystaniem stanowiska badawczego II generacji, opisanego szczegółowo w części I pracy [4]. Szczegółową metodykę i plan badań przedstawiono w części II pracy [5]. W skróconym ujęciu, badania miały następujący przebieg:

Dla elementu badanego nr 1: przeprowadzono 3-krotny pomiar przy użyciu 100% wodoru w warunkach zbliżonych do próby szczelności: po napełnieniu elementu wodorem do ciśnienia > 400 kPa oczekiwano 4 h na stabilizację parametrów, następnie rejestrowano parametry przez 24 h zarówno w elemencie badanym, jak i komorze stanowiącej jego otoczenie. W komorze badano także stężenie wodoru czujnikiem o zakresie 1000 ppm. Po zakończeniu próby następowało przedmuchiwanie elementu i komory azotem oraz postój min. 24 h.

Po trzykrotnym przeprowadzeniu próby przeprowadzono analogiczny test z użyciem azotu oraz metanu (stwierdzono przy tym opóźnione uwalnianie resztkowego wodoru z elementu).

Dla elementu badanego nr 2 przeprowadzono dodatkowo 2 próby kontrolne (N₂, CH₄) przed próbami zasadniczymi. Podczas tych prób nie stwierdzono obecności wodoru w komorze. Następnie przeprowadzono 3 próby zasadnicze (H₂), oraz jedną końcową próbę kontrolną (N₂), podczas której ponownie stwierdzono opóźnione uwalnianie resztkowego wodoru.

2.2. Objętość i zmiany ilości gazu, koncentracja wodoru

W celu wyznaczenia objętości przestrzeni pomiędzy zewnętrzną powierzchnią kompensatora a wewnętrzną powierzchnią komory badawczej zastosowano metodę opartą na II twierdzeniu Pappusa–Guldinusa, umożliwiającą określenie objętości bryły obrotowej na podstawie pola przekroju osiowego oraz położenia środka ciężkości analizowanej powierzchni:

$$V = A \cdot 2\pi r \quad (1)$$

gdzie:

A – pole przekroju wolnej przestrzeni, m^2

r – odległość środka ciężkości od osi obrotu, m

Wielkości A oraz r określono na podstawie modelu CAD. Dla $A = 0,16 m^2$ oraz $r = 0,098 m$ otrzymano $V = 0,985 m^3$.

Ilość gazu zawartą w elemencie oraz analogicznie w komorze określono za pomocą równania stanu gazu doskonałego podstawiając odpowiednie parametry p , T , V :

$$n = \frac{pV}{R_u T} \quad (2)$$

gdzie R_u jest uniwersalną stałą gazową równą $8,314 J/(mol \cdot K)$.

Zmiana ilości gazu $\Delta n = n_2 - n_1$, również wyznaczana osobno dla komory i dla elementu wskazuje, czy na podstawie równania stanu stwierdzono przyrost czy ubytek cząstek gazu.

Koncentrację wodoru (wyrażoną w mol/m^3) wyznaczono jako liczbę moli wodoru w jednostce objętości, przy czym liczbę moli wyznaczono na podstawie bezpośrednio zmierzonego udziału molowego x_{H_2} :

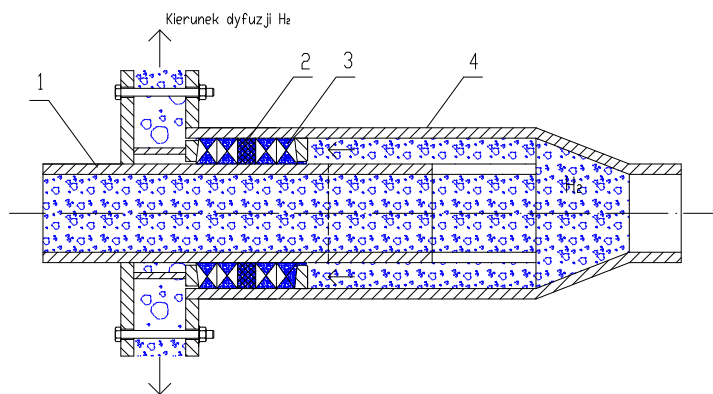
$$C_{H_2} = \frac{x_{H_2} \cdot n}{V} \quad (3)$$

Koncentrację wyznaczano zarówno dla elementu jak i komory, przy czym dla elementu przyjęto $x_{H_2} = 1$. Wyniki obliczeń dotyczące zmian ilości i koncentracji gazu przedstawiono w tabelach 3 i 4.

2.3. Stopień zaprasowania materiału

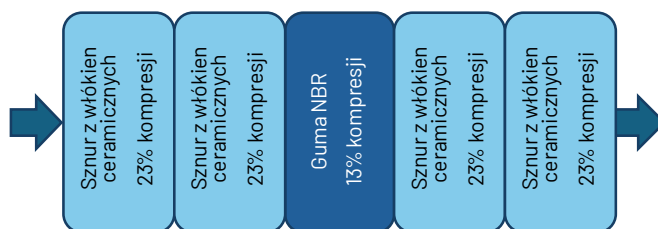
Wyznaczony w dalszym toku pracy współczynnik dyfuzji uwzględnia rzeczywiste warunki pracy uszczelnienia, w tym stopień kompresji sznura, wynikający z geometrii badanego połączenia i docisku materiału uszczelniającego. Kompresja ta odnosi się do rzeczywistych warunków badania, obejmujących geometrię uszczelnienia, stopień kompresji materiału, średniego ciśnienia próby $413,405 kPa$ oraz czasu trwania badania $24 h$. Konfiguracja geometryczna uszczelnienia w kompensatorze przedstawiona jest na rys. 1.

W analizowanym przypadku przegroda uszczelniająca została utworzona z czterech warstw sprasowanego sznura ceramicznego oraz jednej warstwy gumy NBR. Materiały te są obecnie stosowane w rozwiązaniach wykorzystywanych w gazownictwie. Uszczelnienie charakteryzuje się geometrią pierścieniową, obejmującą cały obwód dławicy kompensatora. Schemat budowy przegrody uszczelniającej oraz przekrój badanego elementu przedstawiono na rys. 2.



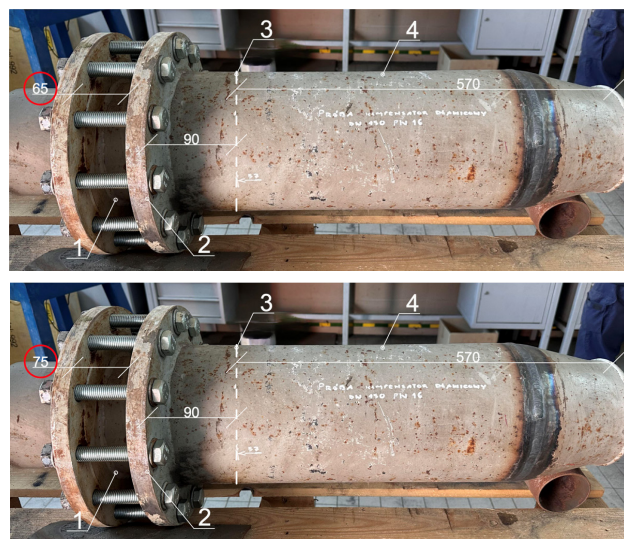
Rys. 1. Uszczelnienie dławicy kompensatora: 1) rura przewodowa DN 150, 2) warstwa uszczelniająca z gumy NBR, 3) warstwa uszczelniająca z plecionego włókna ceramicznego SiO_2 , 4) korpus kompensatora. Źródło: opracowanie własne

Fig. 1. Expansion joint gland seal: 1) DN 150 pipe, 2) NBR rubber sealing layer, 3) SiO_2 braided ceramic fibre sealing layer, 4) expansion joint body. Source: authors' own study



Rys. 2. Schemat uszczelnienia dławicy kompensatora-kolejność przegrody. Źródło: opracowanie własne

Fig. 2. Diagram of the expansion joint gland seal – sequence of the seal elements. Source: authors' own study



Rys. 3. Pomiar stopnia zaprasowania całości systemu uszczelnienia przed (65 mm) i po odkręceniu śrub montażowych (75 mm). Na rysunku: 1) dławica kompensatora, 2) kołnierz, 3) granica dławicy, 4) osłona. Źródło: opracowanie własne

Fig. 3. Permanent compression measurement for the entire sealing system before and after the mounting bolts have been removed. 1) expansion joint gland, 2) flange, 3) gland boundary, 4) cover. Source: authors' own study

Stopień sprasowania poszczególnych elementów uszczelnienia określono na podstawie pomiarów wymiarów materiałów – przedstawionych na rys. 3, przed zabudową oraz po ich wyjęciu z dławicy. Wyznaczony doświadczalnie efektywny współczynnik dyfuzji odnosi się do całej przegrody uszczelniającej pracującej przy rzeczywistym stopniu kompresji, który dla każdej warstwy wynosi:

$$K_i = \frac{h_0 - h_k}{h_0} \cdot 100 \% \quad (4)$$

gdzie:

K_i – stopień kompresji warstwy, %

h_0 – grubość warstwy przed kompresją, mm

h_k – grubość warstwy po sprasowaniu materiału, mm

Stopień kompresji całego układu obliczono uwzględniając sumaryczną grubość 4 warstw włókien ceramicznych oraz 1 warstwy gumy NBR, odpowiednio przed i po kompresji. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 4.

2.4. Proces dyfuzji, efektywny współczynnik dyfuzji

Rzeczywisty strumień przenikania wodoru przez badaną przegrodę uszczelniającą określono na podstawie I prawa Ficka, przyjmując, że proces dyfuzji zachodzi w warunkach ustalonych, a siłą napędową transportu jest różnica stężeń wodoru po obu stronach przegrody:

$$J = -D_{\text{eff}} \frac{\Delta C}{L} \quad (5)$$

gdzie:

J – gęstość strumienia przenikania, mol/(m²·s)

D_{eff} – efektywny współczynnik dyfuzji, m²/s

ΔC – różnica stężeń wodoru, mol/m³

L – droga dyfuzji, m

Z równania (5) można wyznaczyć efektywny współczynnik dyfuzji, w tym celu należy powiązać gęstość strumienia przenikania ze wzrostem liczby moli wodoru w jednostce czasu oraz z polem powierzchni przenikania:

$$D_{\text{eff}} = \frac{|\Delta n| \cdot L}{\Delta \tau \cdot A \cdot \Delta C} \quad (6)$$

gdzie:

$|\Delta n|$ – wartość bezwzględna przyrostu/ubytku molowego w trakcie próby, mol

$\Delta \tau$ – czas próby, s

A – pole powierzchni przenikania, m²

Różnicę stężeń wodoru przed i za przegrodą wyznaczono na podstawie jego ciśnień po obu stronach przegrody, przy czym po stronie elementu ciśnienie składnikowe równe jest całkowitemu (100% H₂), a po stronie komory ciśnienie cząstkowe wodoru jest bardzo niskie, i wynika ze średniego udziału molowego wodoru $\bar{x}_{H_2}$ w czasie trwania próby:

$$\Delta C = \frac{p_1 - \bar{x}_{H_2} p_2}{R_u \cdot T} \quad (7)$$

Wyniki obliczeń przedstawiono w sekcji 3.4.

Dyskusja: W równaniu (7) pojawia się ciśnienie cząstkowe wodoru po stronie komory. Jak wynika z badań (por. punkt 3), ciśnienie to wynosi zaledwie ok. 3–5 Pa. Taka wartość jest słuszna do obliczeń, jeżeli założyć, że podstawowym mechanizmem transportu wodoru jest statystyczny transport cząstek przez ma-

teriał opisany prawem Ficka (wnikanie do materiału po stronie elementu, przypadkowe ruchy cząstek przez element, odpływ cząstek wodoru z elementu do ośrodka gazowego w komorze). Tym niemniej, w przypadku uszczelnień kompensatora może zachodzić również inny mechanizm polegający na nieznacznym, ale makroskopowym przepływie gazu przez niewielkie, kapilarne kanały gazowe. Ten ruch jest zasadniczo jednokierunkowy i jest wywołany różnicą ciśnień całkowitych gazu, niezależnie od tego, czy po stronie wylotowej znajduje się azot, wodór czy inny gaz. Z tego względu należy podkreślić, że efektywny współczynnik dyfuzji stanowi statystyczne uśrednienie zjawiska transportu na potrzeby praktyczne, a nie precyzyjny opis jego rzeczywistego fizycznego charakteru.

2.5. Strumień molowy i oszacowanie skutków dla sieci dystrybucyjnej

Wyznaczony doświadczalnie strumień molowy dla pojedynczego kompensatora wynosi:

$$\dot{n} = J \cdot A \quad (8)$$

Natomiast roczną ilość wodoru utraconego z sieci ze wszystkich kompensatorów o tym samym rozmiarze, zabudowanych na sieci średniego ciśnienia można oszacować jako:

$$\Delta V_n \approx N \cdot \dot{n} \cdot \bar{v}_n \cdot \tau_r \quad (9)$$

gdzie:

N – liczba kompensatorów na sieci ($N = 7264$)

$\bar{v}_n$ – normalna objętość molowa, $\bar{v}_n = 0,02242 \text{ m}_n^3/\text{mol}$

τ_r – czas 1 roku wyrażony w sekundach ($8760 \cdot 3600 \text{ s}$)

Dodatkowo, można wyznaczyć ubytek masowy przyjmując gęstość normalną $\rho_n = 0,0899 \text{ kg/m}^3$. Wyznaczona wielkość dotyczy tylko kompensatorów DN 150 i stanowi oszacowanie górne, ponieważ część kompensatorów pracuje na niskim ciśnieniu, co wielokrotnie zmniejsza skalę zachodzącej w nich dyfuzji. Równocześnie, badane kompensator 1 i 2 dały znacząco różne wyniki, przez co również mogą one posłużyć do określenia dolnej i górnej granicy oszacowania. Precyzyjne określenie strat wymagałoby przebadania wszystkich eksploatowanych kompensatorów, co jest w praktyce niemożliwe. Wyniki obliczeń przedstawiono w sekcji 3.5.

3. Wyniki badań

3.1. Wyniki pomiarów zasadniczych

Bezpośrednie wyniki pomiarów zasadniczych realizowanych trzykrotnie na czystym wodorze dla obu elementów badanych przedstawiono w tabeli 1 oraz tabeli 2.

Jak można zauważyć, w każdej próbie zwiększała się koncentracja wodoru w komorze, jednak dla elementu 1 koncentracja wzrastała jedynie do ok. 60–90 ppm, podczas gdy dla elementu 2 koncentracja ta osiągała wartość kilkuset ppm, przy czym w dwóch przypadkach wartość bliską progowi czujnika wodoru osiągnięto po upływie krótszego czasu niż 24 h, co wymusiło wcześniejsze zakończenie próby.

Tabela 1. Wyniki pomiaru dla I cyklu badań. E – element badany: kompensator nr 1 DN 150 PN16, K – komora. Źródło: opracowanie własne

Table 1. Experimental results for the 1st cycle: E – tested element (expansion joint DN 150 PN16), K – testing chamber. Source: authors' own study

Wielkość	Jedn.	Próba 1		Próba 2		Próba 3	
		E	K	E	K	E	K
$X_{H2,1}$	Ppm		67,13		77,94		28,97
$X_{H2,2}$	Ppm		79,43		89,19		57,54
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
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
T_2	K	291,5	291,5	291,7	291,7	293,6	293,6
Δ_t	S	86 400		86 400		86 400	

Tabela 2. Wyników pomiaru dla II cyklu badań. E – element badany: kompensator nr 2 DN 150 PN16, K – komora. Źródło: opracowanie własne

Table 2. Experimental results for the 2nd cycle: E – tested element (expansion joint No. 2 DN 150 PN16), K – testing chamber. Source: authors' own study

Wielkość	Jedn.	Próba 1		Próba 2		Próba 3	
		E	K	E	K	E	K
$X_{H2,1}$	Ppm		32,19		89,88		3,979
$X_{H2,2}$	Ppm		997,79		992,59		601,888
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
V	m ³	0,038	0,0985	0,038	0,0985	0,038	0,0985
T_1	K	298,7	298,7	299,7	299,7	303,1	303,1
T_2	K	299,6	299,6	298,1	299,9	303,2	303,2
Δ_t	S	79 644		54 024		86 400	

3.2. Wyniki obliczeń ilościowych

Tabele 3 oraz 4 przedstawiają wyniki bilansu ilości gazu zrealizowanego dwiema metodami. W pierwszej części każdej z tabel przedstawiono obliczenie ilości gazu w elemencie oraz w komorze na początku oraz na końcu próby na podstawie objętości oraz zmierzonych parametrów stanu (ciśnienia i temperatury). Obliczenia te dotyczą całości gazu w każdym z obiektów (elemencie i komorze) bez rozróżnienia jego składu. W drugiej części każdej z tabel obliczono przyrost ilości wodoru w komorze na podstawie pomiaru jego stężenia czujnikiem elektrochemicznym. Dodatkowo, przedstawiono koncentrację wodoru w elemencie i w komorze.

Widoczne jest, że pomiar parametrów stanu nie jest wystarczający do zbadania i ilościowego określenia zjawiska dyfuzji. Teoretycznie należałoby oczekiwać następujących wyników:

- 1. Zmiana ilości gazu w elemencie jest zawsze ujemna (ubytek).
- 2. Zmiana ilości gazu w komorze jest zawsze dodatnia (przyrost).
- 3. Zmiany te są sobie równe (układ szczelny i izolowany od otoczenia).

Tabela 3. Bilans molowy gazów dla elementu badanego nr 1. E – element badany, K – komora. Źródło: opracowanie własne

Table 3. Molar balance of gases for element No. 1: E – tested element, K – testing chamber. Source: authors' own study

Wielkość	Jedn.	Próba 1		Próba 2		Próba 3	
		E	K	E	K	E	K
A. Wyniki na podstawie pomiaru ciśnienia, temperatury i objętości							
V	m ³	0,038	0,096	0,038	0,096	0,038	0,096
n_1	mol	6,506	4,021	6,507	4,027	6,661	3,989
n_2	mol	6,506	4,025	6,506	4,028	6,652	3,979
Δ_n	mol	0,000	+0,004	-0,001	+0,001	-0,009	-0,010
B. Wyniki na podstawie pomiaru koncentracji							
$X_{H2,1}-X_{H2,2}$	ppm		+12,30		+11,25		+28,57
C_1	mol/m ³	171,2	2,8·10 ⁻³	171,2	3,3·10 ⁻³	175,3	1,2·10 ⁻³
C_2	mol/m ³	171,2	3,3·10 ⁻³	171,2	3,7·10 ⁻³	175,0	2,4·10 ⁻³
Δ_n	mol		+4,94·10⁻⁵		+4,53·10⁻⁵		+1,14·10⁻⁴

Tabela 4. Bilans molowy gazów dla elementu badanego nr 2. E – element badany, K – komora. Źródło: opracowanie własne

Table 4. Molar balance of gases for element No. 2: E – tested element, K – testing chamber. Source: authors' own study

Wielkość	Jedn.	Próba 1		Próba 2		Próba 3	
		E	K	E	K	E	K
A. Wyniki na podstawie pomiaru ciśnienia, temperatury i objętości							
V	m ³	0,038	0,096	0,038	0,096	0,038	0,096
n_1	mol	6,625	3,919	6,500	3,907	6,309	3,864
n_2	mol	6,590	3,918	6,472	3,891	6,281	3,861
Δ_n	mol	-0,034	+0,001	-0,028	-0,015	-0,028	-0,004
B. Wyniki na podstawie pomiaru koncentracji							
$X_{H2,1}-X_{H2,2}$	ppm		965,60		902,71		597,909
C_1	mol/m ³	174,3	1,8·10 ⁻³	171,1	3,7·10 ⁻³	166,0	0,2·10 ⁻³
C_2	mol/m ³	173,4	40,7×10 ⁻³	170,3	40,2×10 ⁻³	165,3	24,2×10 ⁻³
Δ_n	mol		+3,78·10 ⁻³		+3,53·10 ⁻³		+2,31·10 ⁻⁴

W rzeczywistości wyznaczone przyrosty molowe nie są jednorodne, np. w próbie 1 elementu 1 wyznaczony ubytek gazu z elementu jest zerowy, w próbie 3 elementu 1 a także w próbach 2 i 3 elementu 2 następuje (wbrew oczekiwaniom) ubytek gazu z komory. W większości wypadków odnotowany jest niewielki ubytek molowy wodoru z elementu (E), co jest zgodne z fizyką zjawiska. Niejednorodne wyniki są związane z tym, że dyfuzja następuje również z komory do otoczenia (uszczelnienie manszetowe), a także z niepewnością pomiarów ciśnienia i temperatury.

Bardziej miarodajny jest pomiar elektrochemiczny, który jednoznacznie wskazuje na wzrost koncentracji wodoru w komorze, co pozwala na kwantyfikację migracji. Widoczne jest, że dla elementu nr 1 (bardziej szczelnego) migracja jest o dwa rzędy wielkości mniejsza niż rejestrowane zmiany ilości wg parametrów stanu, natomiast dla elementu nr 2 migracja jest mniejsza o jeden rząd wielkości. Z tego względu do dalszych rozważań dotyczących dyfuzji przyjęto wynik wg pomiaru elektrochemicznego.

3.3. Wyniki pomiarów kompresji

Tabela 5. Pomiary stopnia kompresji elementów uszczelnienia.
Źródło: opracowanie własne

Table 5. Measurements of the compression degree of sealing elements. Source: authors' own study

Element uszczelnienia	Wymiar przed h_o , mm	Wymiar po h_k , mm	Stopień kompresji K_i , %
Sznur z włókien ceramicznych	21,84	16,55	23,76
Guma NBR	22,30	19,54	12,38
Całość układu	109,66	86,14	21,45

Widoczne jest, że przegroda jako całość została zaprasowana o ok. 21,5%, przy czym sznur ceramiczny wykazuje większe odkształcenie (23,8%) niż warstwa gumy NBR (12,4%). Należy podkreślić, że wyniki stopnia kompresji dotyczą porównania fabrycznie nowych elementów z elementami wyjętymi z eksploatowanego wiele lat kompensatora. Staje się to widoczne po dodatkowej analizie stopnia kompresji ocenianego tylko na podstawie zewnętrznych wymiarów, tj. odległości między kołnierzami. Jak widać na rys. 3, odległość ta wynosi 65 mm w stanie eksploatacyjnym (zaprasowanym) oraz 75 mm po poluzowaniu śrub kompensatora, co daje 10 mm różnicy (stopień kompresji <10%), znacznie mniej niż wynikałoby z różnicy $109,66 - 86,14 = 23,52$ mm widocznej w tabeli 5. Oznacza to, że sprasowanie jest w znacznym stopniu nieodwracalne, a do oceny stopnia kompresji należy wykorzystać wymiar fabrycznie nowych elementów, tak jak to przedstawiono w tabeli 5.

3.4. Wyniki obliczeń procesu dyfuzji

Wyniki obliczeń procesu dyfuzji dla badanych elementów przedstawiono w tabelach 6 oraz 7.

Tabela 6. Obliczenia procesu dyfuzji elementu badanego nr 1.
Źródło: opracowanie własne

Table 6. Calculation of the diffusion process for element No. 1.
Source: authors' own study

Wielkość	Próba 1	Próba 2	Próba 3
Średni udział wodoru w komorze, $\bar{x}_{H_2}$, ppm	$7,33 \cdot 10^{-5}$	$8,36 \cdot 10^{-5}$	$4,33 \cdot 10^{-5}$
Różnica stężeń, ΔC , mol/m ³	170,9	171,2	175,2
Przyrost udziału wodoru w komorze, Δx_{H_2} , ppm	12,3	11,2	28,6
Molowy transport wodoru do komory, Δn , mol	$4,94 \cdot 10^{-5}$	$4,53 \cdot 10^{-5}$	$1,14 \cdot 10^{-4}$
Efektywny współczynnik dyfuzji, D_{eff} , m ² /s	$2,22 \cdot 10^{-11}$	$2,03 \cdot 10^{-11}$	$4,99 \cdot 10^{-11}$
Gęstość strumienia dyfuzji, J , mol/s m ²	$4,40 \cdot 10^{-8}$	$4,03 \cdot 10^{-8}$	$1,01 \cdot 10^{-7}$

Tabela 7. Obliczenia procesu dyfuzji elementu badanego nr 2.
Źródło: opracowanie własne

Table 7. Calculation of the diffusion process for element No. 2.
Source: authors' own study

Wielkość	Próba 1	Próba 2	Próba 3
Średni udział wodoru w komorze, $\bar{x}_{H_2}$, ppm	$5,15 \cdot 10^{-4}$	$5,41 \cdot 10^{-4}$	$3,03 \cdot 10^{-4}$
Różnica stężeń, ΔC , mol/m ³	173,7	170,1	165,4
Przyrost udziału wodoru w komorze, Δx_{H_2} , ppm	965,6	902,7	597,9
Molowy transport wodoru do komory, Δn , mol	$3,78 \cdot 10^{-3}$	$3,53 \cdot 10^{-3}$	$2,31 \cdot 10^{-3}$
Efektywny współczynnik dyfuzji, D_{eff} , m ² /s	$1,82 \cdot 10^{-9}$	$2,54 \cdot 10^{-9}$	$1,07 \cdot 10^{-9}$
Gęstość strumienia dyfuzji, J , mol/s m ²	$3,67 \cdot 10^{-6}$	$5,02 \cdot 10^{-6}$	$2,06 \cdot 10^{-6}$

Widoczne jest, że efektywny współczynnik dyfuzji jest o dwa rzędy wielkości wyższy dla elementu badanego nr 2. Wartości pomiędzy pomiarami tego samego elementu różnią się, jednak są podobnego rzędu. Wyniki dla elementu 2 są zbliżone do wartości dla pojedynczego uszczelnienia NBR raportowanego w literaturze [11], natomiast dla elementu 1 uszczelnienie o 2 rzędy wielkości lepsze. Do oszacowania skali strat w sieci dystrybucyjnej przyjęto wariant najlepszy (element 1, próba nr 2) oraz najgorszy (element 2, próba nr 2).

3.5. Wyniki oszacowania strat w skali sieci dystrybucyjnej

Oszacowanie strat w oparciu o najlepszy i najgorszy wynik pomiaru przedstawiono w tabeli 8. Wyniki te tworzą scenariusz optymistyczny oraz pesymistyczny. Przeprowadzone obliczenia wskazują, że przy zastosowanej konstrukcji uszczelnienia dławicy kompensatora, obejmującej warstwy sznura ceramicznego oraz gumy NBR, intensywność dyfuzyjnego przenikania wodoru jest bardzo mała, nawet dla warunku pesymistycznego.

Tabela 8. Estymacja skali dyfuzji dla kompensatora DN 150 oraz ich populacji w sieci. Źródło: opracowanie własne

Table 8. Estimation of the diffusion scale for a single DN 150 expansion joint, and for their entire population in the network. Source: authors' own study

Wielkość	Opt	Pes
Strumień molowy wodoru, n , mol/s	$1,32 \cdot 10^{-9}$	$6,53 \cdot 10^{-6}$
Ubytek roczny wodoru, Δn_i , m ³	0,00093	0,0462
Ubytek roczny ($N = 7264$), Δn , m ³	6,8	335,4
Ubytek masowy, Δm , Kg	0,61	30,2

4. Wnioski

Podstawowe wnioski z badań przedstawiono w części II artykułu. W oparciu o dodatkową analizę dotyczącą struktury uszczelniania, procesu dyfuzji oraz jego odniesienia do całości sieci dystrybucyjnej można wysnuć dodatkowe wnioski:

Element nr 1 był eksploatowany na sieci średniego ciśnienia, co mogło spowodować wyższy stopień kompresji niż dla elementu nr 2, gdyż uszczelnienie było przez wiele lat dodatkowo dociśnięte nadciśnieniem gazu.

Uzyskane wartości wskazują, że prawidłowo uszczelniona dławica kompensatora nie stanowi istotnego źródła strat gazu. W konsekwencji dyfuzyjne przenikanie wodoru przez tego typu przegrody nie powinno mieć znaczącego wpływu na bilans strat gazu w systemie.

Z punktu widzenia bezpieczeństwa, uzyskane wartości stężeń wodoru w otoczeniu źródła emisji osiągnęły w najgorszym przypadku wartości ok. 1000 ppm, tj. ok. 2,5% dolnej granicy wybuchowości. Dotyczy to celowo zamkniętej, doszczelnionej i niewentylowanej przestrzeni. W przypadku sieci gazowych, nie powstaje zatem istotne ryzyko, jednak w obiektach zamkniętych takich jak stacje gazowe czy budynki z instalacjami gazowymi niezbędny może być dodatkowy monitoring stężenia wodoru.

Kompensatory dławicowe są urządzeniami eksploatowanymi w warunkach podziemnych, gdzie otaczający grunt stanowi dodatkową barierę ograniczającą migrację wodoru. Tym samym prawdopodobieństwo wystąpienia zagrożenia wynikającego wyłącznie z dyfuzyjnego przenikania gazu przez uszczelnienie ulega dalszemu zmniejszeniu

Przedstawione wnioski pozostają jednak aktualne pod warunkiem, że kompensatory znajdują się w należytych stanie technicznym, a ich elementy uszczelniające zachowują swoje właściwości użytkowe. Założono zatem, że kompensator nie uległ degradacji wskutek procesów korozyjnych, starzenia materiałów uszczelniających ani odkształceń mechanicznych mogących prowadzić do utraty szczelności połączenia. W takich warunkach wyznaczony doświadczalnie efektywny współczynnik dyfuzji może stanowić wiarygodny wskaźnik oceny potencjalnego ryzyka związanego z przenikaniem wodoru przez dławice kompensatorów stosowanych w systemach dystrybucyjnych.

5. Literatura

- [1] Amid, A., Mignard, D., & Wilkinson, M. (2016). Seasonal storage of hydrogen in a depleted natural gas reservoir. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(12), 5549–5558. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.02.036>
- [2] Bo, Z., Zeng, L., Chen, Y., & Xie, Q. (2021). Geochemical reactions-induced hydrogen loss during underground hydrogen storage in sandstone reservoirs. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(38), 19998–20009. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.116>
- [3] Carden, P., & Paterson, L. (1979). Physical, chemical and energy aspects of underground hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 4(6), 559–569. [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(79\)90083-1](https://doi.org/10.1016/0360-3199(79)90083-1)
- [4] Kroczek, 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), 12. <https://doi.org/10.15199/17.2025.7-8.2>
- [5] Kroczek M., Malanowski G., Kostowski W., (2026). Badania szczelności połączeń sieci dystrybucyjnej w aspekcie wykorzystania wodoru – część II: wyniki badań. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 100(7). <https://doi.org/10.65545/GWITS.2026.07.01>
- [6] Mejia, A. H., Brouwer, J., & Mac Kinnon, M. (2020). Hydrogen leaks at the same rate as natural gas in typical low-pressure gas infrastructure. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(15), 8810–8826. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.159>
- [7] Niermann, M., Timmerberg, S., Drünert, S., & Kaltschmitt, M. (2020). Liquid Organic Hydrogen Carriers and alternatives for international transport of renewable hydrogen. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110171. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110171>
- [8] Izba Gospodarcza Gazownictwa. (2025). ST-IGG-0902:2025. Gazociągi. Próby ciśnieniowe gazociągów stalowych. Warszawa: Izba Gospodarcza Gazownictwa.
- [9] 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>
- [10] Zheng, Y., Tan, Y., Zhou, C., Chen, G., Li, J., Liu, Y., Liao, B., & 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>
- [11] 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>