

# Badania szczelności wodorowych zaworów regulacyjnych

## Leak testing of hydrogen control valves

MARIUSZ WNĘK

DOI 10.36119/15.2025.12.4

W publikacji zaprezentowano metodykę i stanowisko badawcze nieszczelności wewnętrznej zaworów dla instalacji wodorowej. Zawór badawczy charakteryzował się możliwością wymiany kształtki. Kształtki były wykonane z kompozytów tworzyw sztucznych a ich kształt (pobocznicą boczną) była zaprojektowana i wykonana pod kątem właściwej podstawowej charakterystyki regulacyjnej. W pracy zaprezentowano badania trzech kształtek – różny materiał kompozytowy przy tej samej konstrukcji. Wynikiem publikacji jest zaprezentowanie nieszczelności wewnętrznej dla rozważanych kształtek zaworowych dla zaworów wodorowych i zhierarchizowanie ich pod względem jakości szczelności.

**Słowa kluczowe:** zawór stożkowy, zawór wodorowy, szczelność wewnętrzna, badania szczelności.

The publication presents the methodology and research position on the internal tightness of valves for hydrogen installations. The test valve was characterized by the possibility of replacing the fitting. The fittings were made of plastic composites and their shape (side branch) was designed and manufactured with a view to ensuring the correct basic control characteristics. The paper presents tests of three fittings – different composite materials with the same design. The result of the publication is the presentation of internal tightness for the considered valve fittings for hydrogen valves and their ranking in terms of tightness quality.

**Keywords:** cone valve, hydrogen valve, internal tightness, leak testing.

Zawory wodorowe to bardzo specjalistyczna armatura przeznaczona do działania w warunkach z bardzo nietypowym gazem, który jest wyjątkowo lekki, łatwopalny i przenika przez wiele materiałów, co stawia wysokie wymagania techniczne w zakresie bezpieczeństwa, szczelności i odporności materiałowej. Łatwopalność wodoru definiuje bardzo niski próg zapłonu mieszaniny gazu w powietrzu już od ok. 4%, a granica wybuchowości rozpoczyna się od stężenia 18%. Pod uwagę należy również wziąć temperaturę samozapłonu, która wynosi ok. 560-585°C [1,2].

Ogólnie zawory wodorowe to konstrukcje przemysłowych instalacji przepływowych stosowane do kontrolowania przepływu wodoru, odcinania, regulowania lub kierowania strumienia wodoru w instalacjach oraz zapewnienia szczelności i bezpieczeństwa w systemach z wodorem pod wysokim ciśnieniem [3],[5].

Najczęściej stosowanymi typami zaworów dla instalacji wodorowej to: kulowe – do szybkiego odcięcia przepływu, iglicowe – do precyzyjnej regulacji przepływu, zwrotne – zapobiegające cofaniu się wodoru, bezpieczeństwa – chroniące

przed nadmiernym ciśnieniem oraz elektromagnetyczne – do automatycznej regulacji przepływu wodoru.

Najczęściej stosowanymi materiałami dla zaworów wodorowych jest stal nierdzewna (np. 316L) – odporna na korozję i kruchość wodorową, stopy metali z udziałem niklu oraz elastomery i uszczelnienia, które muszą być kompatybilne z wodorem.

### Warunki badań szczelności gniazda

Procedury badawcze nieszczelności zaworów regulacyjnych określają stosowne normy [6],[7].

Zgodnie z tymi normami rozróżnia się: nieszczelność stawidła oraz szczelność zewnętrzną zaworu. Czynnikiem badawczym powinien być czysty gaz (powietrze albo azot) lub woda o temperaturze od 5 do 40°C. Woda może zawierać inhibitor korozji. Do badań w ramach niniejszej pracy, ze względu na specyficzne właściwości, przewidziano również wodór.

W określeniu warunków badań szczelności gniazda norma przewiduje, że:

- czynnik badawczy doprowadza się do króćca dolotowego badanego zaworu;
- wylot korpusu może być otwarty do atmosfery lub połączony z czujnikiem do pomiaru strumienia o niskiej różnicy ciśnień, którego wylot jest otwarty do atmosfery;
- w trakcie napełniania zaworu wodą lub gazem, powinien on być otwarty, a jego korpus wypełniony całkowicie, łącznie z częścią wylotową;
- następnie zawór się zamyka. Gdy przeciek gazu lub wody ustabilizuje się, należy mierzyć jego przebieg przez wystarczająco długi czas w celu uzyskania określonej dokładności, w zakresie  $\pm 10\%$  wartości strumienia nieszczelności (przecieku) i ciśnienia. Normy przewidują, oprócz wskazania warunków, dwie procedury badawcze szczelności zaworów wodorowych:
- Procedura 1. Ciśnienie czynnika badawczego powinno być zawarte w przedziale 300 – 400 kPa, lub w zakresie  $\pm 5\%$  maksymalnego, roboczego spadku ciśnienia w zaworze, jeśli wartość tego spadku jest mniejsza od 350 kPa,

- Procedura 2. Różnica ciśnień podczas badania powinna zawierać się w zakresie  $\pm 5\%$  maksymalnego, roboczego spadku ciśnienia w zaworze. Klasy nieszczelności, czynniki badawcze, procedury badawcze oraz maksymalne strumienie przecieków w stawidle zaworu podano w tab. 1 [7].

nieszczelność zaworu. Według wyznaczonego w ten sposób strumienia masy można oszacować strumień objętości sprowadzony do tzw. warunków normalnych, gdyż taka postać jest częściej spotykana w normach i literaturze branżowej. Układ badawczy musi gwarantować wypełnienie tylko tym rodzajem gazu, dla

upewnić się, że mierzona nieszczelność dotyczy zaworu a nie przyłączy.

Po opracowaniu metodyki badawczej określania nieszczelności wewnętrznej zaworów wodorowych zbudowano stanowisko badawcze (rys. 2). Ze względu na przyjętą metodykę niezbędne było określenie objętości układu badawczego. Z powodu zastosowania różnego rodzaju zaworów i aparatury, znajdujących się w układzie, bardzo trudne byłoby oszacowanie tej objętości w sposób analityczny. Do określenia tej wielkości dla Zb<sub>1</sub> przyjęto metodę polegającą na wypełnieniu układu wodą a następnie na podstawie pomiaru jej masy i parametrów termicznych wyznaczono objętość, która wynosiła ok. 7,6 cm<sup>3</sup> i została oszacowana z niepewnością metody poniżej 0,5% (zastosowanie m.in. wagi laboratoryjnej o wskazaniach masy w gramach do piątego miejsca po przecinku, czujników ciśnienia wytypowanych do kalibracji innych czujników ciśnienia i rezystancyjnych czujników temperatury o dużej dokładności pomiarowej).

Do wyznaczenia objętości Zb<sub>2</sub> wykorzystano termiczne równanie stanu. Zbiorniki Zb<sub>1</sub> i Zb<sub>2</sub> wypełniono wodorem do przyjętego ciśnienia manometrycznego p<sub>1</sub> i p<sub>2</sub>, przy czym Zb<sub>2</sub> odcięto od Zb<sub>1</sub> (poprzez Z<sub>3</sub>) i ustalono p<sub>2</sub><p<sub>1</sub>. Następnie otworzono zawór Z<sub>3</sub>, aby wyrównać ciśnienia manometryczne w obu zbiornikach do wspólnego poziomu p. W wyniku rozwiązania układu termicznych równań stanu, dla zbiorników Zb<sub>1</sub> i Zb<sub>2</sub>, otrzymano zależność na wyznaczenie objętości pomiarowej zbiornika Zb<sub>2</sub>

$$V_{Zb2} = \frac{(p_1 - p)}{(p - p_2)} V_{Zb1} \tag{1}$$

Niepewność względna objętości zbiornika ΔV<sub>Zb2</sub> (zgodnie z teorią przenoszenia niepewności pomiarowych) określono na podstawie

$$\Delta V_{Zb2} = \frac{\delta(p_1 - p)}{p_1 - p} + \frac{\delta(p - p_2)}{p - p_2} + \Delta V_{Zb1} \tag{2}$$

Maksymalna niepewność bezwzględna przetwornika (czujnika) ciśnienia jest niezmienna, stąd δp<sub>1</sub> ≈ δp<sub>2</sub> ≈ δp. Zatem równanie określające maksymalną

Tab.1. Maksymalne przecieki w gnieździe w zależności od klasy nieszczelności

| Klasa nieszczelności | Czynnik badawczy                                   | Procedura badawcza | Maksymalny strumień przecieku                            |
|----------------------|----------------------------------------------------|--------------------|----------------------------------------------------------|
| I                    | Według uzgodnień między zamawiającym a producentem |                    |                                                          |
| II                   | Woda lub gaz                                       | 1                  | $5 \cdot 10^{-3} \cdot \text{strumień projektowy}$       |
| III                  | Woda lub gaz                                       | 1                  | $10^{-3} \cdot \text{strumień projektowy}$               |
| IV                   | Woda<br>Gaz                                        | 1 lub 2            | $10^{-4} \cdot \text{strumień projektowy}$               |
| IV-S1                | Woda<br>Gaz                                        | 1 lub 2            | $5 \cdot 10^{-6} \cdot \text{strumień projektowy}$       |
| IV-S2                | Gaz                                                | 1                  | $2 \cdot 10^{-7} \cdot \Delta p \cdot D \text{ [l/h]}$   |
| V                    | Woda                                               | 2                  | $1,8 \cdot 10^{-7} \cdot \Delta p \cdot D \text{ [l/h]}$ |

gdzie: Δp – spadek ciśnienia w kPa, D – średnica gniazda w mm.

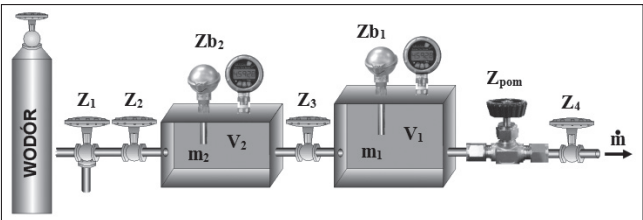
Stanowisko badawcze

W ramach prac badawczych opracowano autorską metodykę prezentacji określenia nieszczelności wewnętrznej zaworów wodorowych, czyli oszacowania strumienia wypływającego gazu przy całkowicie zamkniętym zaworze. Procedura ta nie zmienia zasad określonych przez normy a jedynie rozszerza ich zakres. Metoda polega na przygotowaniu układu (rys. 1) o małej objętości badawczej, który zostaje wypełniony wodorem do odpowiedniego ciśnienia – właściwego dla maksymalnego zakresu przyrządów pomiarowych. Mała objętość daje możliwość określenia niewielkich nieszczelności zaworu oraz ma znaczący wpływ na czas prowadzonych badań.

Według koncepcji metodyki badawczej do układu (rys.1) zainstalowano zawór Z<sub>pom</sub>, który jest elementem badanym i łączącym układ z otoczeniem. Układ taki będzie dążyć do wyrównania ciśnienia z otoczeniem a głównym elementem, przez który nastąpi transport masy gazu będzie wskazany zawór Z<sub>pom</sub> i zawór odcinający Z<sub>3</sub>. Od nieszczelności wewnętrznej tego zaworu będzie zależeć czas uzyskania tzw. stanu równowagi pomiędzy układem pomiarowym a otoczeniem. Im większa nieszczelność wewnętrzna zaworu tym większy strumień wypływającego wodoru i tym krótszy czas uzyskania stanu równowagi. Ze względu na trudny bezpośredni pomiar strumienia wodoru wypływającego z układu (bardzo mały) przyjęto pośredni sposób pomiaru. Podczas badań mierzone były parametry wodoru wypełniającego układ (temperatura, ciśnienie) i na podstawie ich zmian określany był strumień jego masy, czyli

którego przewidziano procedurę pomiarową. Musi być wyposażony w system „przepłukiwania”, który zagwarantuje usunięcie z układu innego gazu np. powietrza. Taki system wymaga dodatkowych przyłączy i zaworów odcinających. Zbudowany do badań układ zawiera dwie objętości pomiarowe (rys. 1), z których jedna (Zb<sub>2</sub>) służy do określenia przecieku przez odcinający zawór przepływający (Z<sub>3</sub>), a druga (Zb<sub>1</sub>) napełniana wodorem i opróżniana z powodu nieszczelności badanego zaworu (Z<sub>pom</sub>). Układ zawiera dodatkowo dwa zawory odcinające (Z<sub>1</sub>, Z<sub>2</sub>), które zapewniają szczelność zbiornika Zb<sub>2</sub>. W procedurze badawczej następuje przepłukanie całego układu wodorem, po czym napełniany jest zbiornik Zb<sub>1</sub> do badawczego ciśnienia manometrycznego, natomiast w zbiorniku Zb<sub>2</sub> ustalane jest ciśnienie manometryczne na poziomie zera. Z układu Zb<sub>1</sub> następuje wypływ wodoru przez badany zawór Z<sub>pom</sub> i odcinający Z<sub>3</sub>, przez co zmniejsza się ciśnienie w Zb<sub>1</sub> i zwiększa w Zb<sub>2</sub>. Pomiar parametrów w Zb<sub>1</sub> i Zb<sub>2</sub> pozwala określić, w oparciu o termiczne równanie stanu (Clapeyrona [8]), nieszczelność badanego zaworu wodorowego Z<sub>pom</sub> przy uwzględnieniu upływu wodoru przez zawór Z<sub>3</sub> (stąd zbiornik Zb<sub>2</sub> jest istotnym elementem stanowiska). Przed rozpoczęciem procedury badawczej testuje się cały układ pod względem szczelności połączeń, aby

Rys. 1. Schemat stanowiska do określenia nieszczelności wewnętrznej zaworów wodorowych  
Fig. 1. Diagram of a station for determining the internal tightness of hydrogen valve

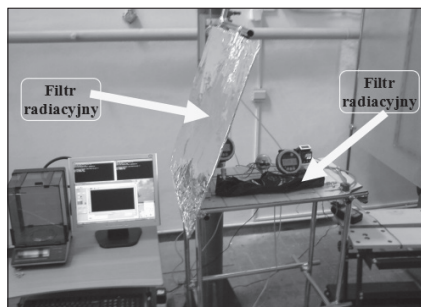


niepewność pomiaru objętości zbiornika  $Zb_2$  przyjmie postać

$$\Delta V_{Zb2} = \frac{2\delta p}{p_1 - p} + \frac{2\delta p}{p - p_2} + \Delta V_{Zb1} \quad (3)$$

Wyznaczona objętość zbiornika  $Zb_2$  wynosi ok.  $5,1 \text{ cm}^3$  i została oszacowana z niepewnością metody poniżej 2%.

Z powodu, że do obliczeń największa niepewność mogła być wprowadzana z pomiarem temperatury, zastosowano filtry radiacyjne (rys. 2) – ograniczające wpływ promieniowania na układ badawczy. Po zainstalowaniu filtrów na zmianę temperatury układu miały wpływ tylko wahania ciśnienia w układzie (na skutek nieszczelności), wypływ wodoru z układu oraz dobową zmienność temperatury otoczenia zależna od warunków pogodowych, pory dnia i nocy.

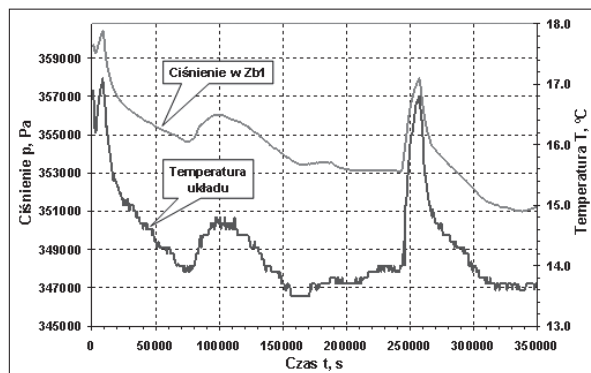


Rys. 2. Stanowisko do określenia szczelności wewnętrznej zaworów wodorowych  
Fig. 2. Station for determining the internal tightness of hydrogen valves

Metodyka określenia nieszczelności wewnętrznej, przyjęta w autorskiej procedurze badawczej, jest bardziej uniwersalna niż proponowana przez normy. Wytyczne ujęte w normach pozwalają określić nieszczelność zaworu tylko dla pewnych i ustalonych warunków. Badania takie określają wprawdzie klasę nieszczelności zaworu, ale nie wskazują zmienności tej nieszczelności w zależności od innych warunków np. termicznych lub czasowych. Zaproponowana i prezentowana w publikacji metoda pozwala określić nieszczelność w szerokim zakresie ciśnienia panującego w układzie i między innymi również dla parametrów definiowanych przez normę.

W ramach badań laboratoryjnych zbudowano i uruchomiono stanowisko do określania nieszczelności zaworów oraz napisano program do zbierania i rejestracji danych. Autorski program został napisany w profesjonalnym i przemysłowym środowisku programowania. Wstępne i testowe pomiary rozruchowe stanowiska zostały zaprezentowane na rys. 3. Po analizie tych badań podjęto decyzję

Rys. 3. Pomiar najważniejszych parametrów na stanowisku badawczym  
Fig. 3. Measurement of the most important parameters at the test stand



o zastosowaniu wskazanej metodyki w procedurze badawczej.

### Badania laboratoryjne

Wartości nieszczelności  $\dot{m}_N$  zaworu wodorowego  $Z_{pom}$  (4) były wyznaczone w oparciu o termiczne równanie stanu (równanie Clapeyrona [9]), a przykładowe wyniki przedstawiono na rys. 4.

$$\dot{m}_N = \frac{dm}{dt} = \frac{V}{R} \left( \frac{1}{T} \frac{dp}{dt} - \frac{p}{T^2} \frac{dT}{dt} \right) \quad (4)$$

gdzie:

- V – objętość komory badawczej,  $\text{m}^3$ ;
- R – indywidualna stała gazowa,  $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ;
- p – ciśnienie manometryczne, Pa;
- T – temperatura, K.

Maksymalną niepewność względną strumienia nieszczelności  $\Delta \dot{m}_{Nmax}$  (zgodnie z teorią przenoszenia niepewności pomiarowych) określono wg zależności

$$\Delta \dot{m}_{Nmax} = \Delta V + \Delta R + \Delta T + \Delta \left( \frac{dp}{dt} - \frac{p}{T} \frac{dT}{dt} \right) \quad (5)$$

Wyznaczenie pochodnej ciśnienia po czasie obliczano numerycznie

$$\frac{dp}{dt} \cong \frac{p_i - p_{i+1}}{t_i - t_{i+1}} \quad (6)$$

gdzie:

$p_i, p_{i+1}$  – wartości bezwzględnego ciśnienia gazu (wodoru) dla czasów pomiaru  $t_i$  oraz  $t_{i+1}$ .

Podobnie wyznaczano pochodną temperatury po czasie.

Wielkości  $\Delta V$ ,  $\Delta R$ ,  $\Delta T$  są odpowiednio niepewnościami względnymi objętości układu, indywidualnej stałej gazowej oraz temperatury.

Niepewności względne różnicy ciśnień i czasu określono, jako

$$\Delta(p_i - p_{i+1}) = \frac{\delta(p_i - p_{i+1})}{p_i - p_{i+1}} = \frac{\delta p_i + \delta p_{i+1}}{p_i - p_{i+1}} \quad (7)$$

$$\Delta(t_i - t_{i+1}) = \frac{\delta(t_i - t_{i+1})}{t_i - t_{i+1}} = \frac{\delta t_i + \delta t_{i+1}}{t_i - t_{i+1}} \quad (8)$$

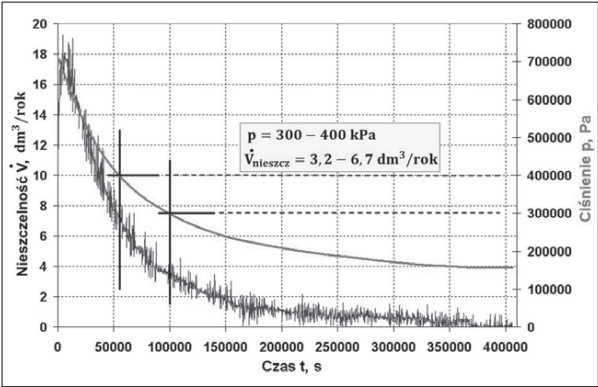
Przyjęto, że  $\Delta R \approx 0$ . Ponadto z powodu, że w kolejnych krokach rejestracji temperatury jej wartość nie zmienia się (dopiero w szerokim zakresie czasu), zakłada się  $T = \text{idem}$  dla obliczeń numerycznych masowego strumienia nieszczelności. Niepewność bezwzględna czujnika ciśnienia jest niezmienna, stąd  $\delta p_i \approx \delta p_{i+1} \approx \delta p$ . Podobnie niepewność bezwzględna generatora czasu w sterowniku przemysłowym, stąd  $\delta t_i \approx \delta t_{i+1} \approx \delta t$ . Zatem równanie określające maksymalną niepewność pomiaru strumienia nieszczelności zaworu ostatecznie przyjmie postać

$$\Delta \dot{m}_{Nmax} \cong \Delta V + \Delta T + 2 \frac{\delta p}{p_i - p_{i+1}} + 2 \frac{\delta t}{t_i - t_{i+1}} \quad (9)$$

Jak zaprezentowano (rys. 4) procedura badawcza (zastosowana w procesie badawczym) umożliwia wyznaczenie nieszczelności zaworu wodorowego (i jakiegokolwiek innego) w szerokim zakresie ciśnienia panującego w układzie. Taki sposób prezentacji wyników, wydaje się być o wiele bardziej czytelny w aspekcie inżynierskim (można wskazać nieszczelność w dowolnie wybranym zakresie 0-700 kPa.) niż informacja uzyskana z procedury określonej przez normę. Na podstawie charakterystyki nieszczelności (rys. 4) można określić zarówno wartość nieszczelności dla badanego zaworu wodorowego wg wytycznych zdefiniowanych w normie jak i dla innego dowolnego ciśnienia układu.

Linia ciągła określa zmianę ciśnienia w zbiorniku  $Zb_1$  a z fluktuacjami – nieszczelność objętościową. Zgodnie z PN zaznaczono również zakres ciśnienia sprawdzania nieszczelności (300-400 kPa). Wyznaczony zakres ciśnienia określania nieszczelności dostarcza również informacji dotyczącej czasu wystąpienia warunków analizy badawczej.

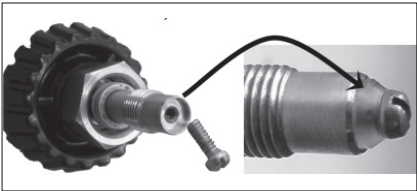
Dla normowanego przedziału (badania wstępne prezentowane na rys. 4) określono nieszczelność zaworu na poziomie ok. 4,9 dm<sup>3</sup>/rok, co wypada w okolicach połowy zakresu normowanego ciśnienia.



Rys. 4. Charakterystyka badań wstępnych nieszczelności badanego testowego zaworu wodorowego  
Fig. 4. Characteristics of preliminary leak tests of the tested hydrogen test valve

W ramach badań laboratoryjnych przeprowadzono analizę zaworu, którego uszczelnienie jest typu tworzywo sztuczne – metal. Końcówka zaworu została tak skonstruowana, żeby była możliwość wymiany kształtki (rys. 5). Można było zatem, zmieniać geometrię grzybka lub rodzaj materiału, wpływając w ten sposób na podstawową charakterystykę przepływową i szczelność zaworu [10],[12].

Do badań szczelności zaworu wykorzystano kształtki wykonane z trzech różnych materiałów. Do analizy i rozróżnienia tych kształtek wprowadzono oznaczenia K1, K2 i K3.



Rys. 5. Regulacyjny zawór wodorowy z wymienną kształtką grzybka  
Fig. 5. Hydrogen regulating valve with replaceable valve head

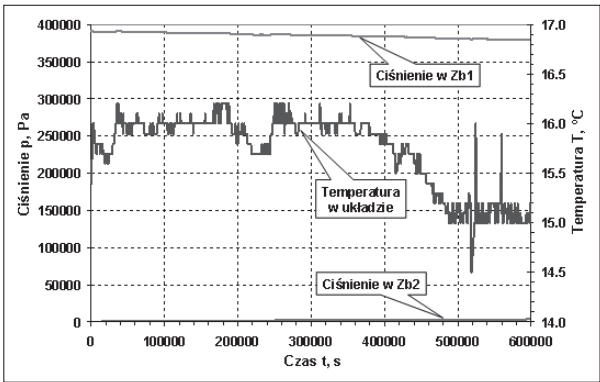
W przypadku prowadzenia badań zaworu wodorowego z wymiennymi kształtkami z tworzywa kompozytowego K1, K2 i K3 zmodyfikowano procedurę badawczą. Dla badanego zaworu ograniczono zakres rozpoczynający się od ciśnienia 700 kPa.

W przypadku zaworów o dużej szczelności ta procedura jest bardzo czasochłonna – pomiary testowe, prowadzone przez 14 dni, wykazały spadek ciśnienia w układzie doświadczalnym ok. 15-20 kPa, wobec czego procedura badawcza w zakresie pomiarów ciśnienia od

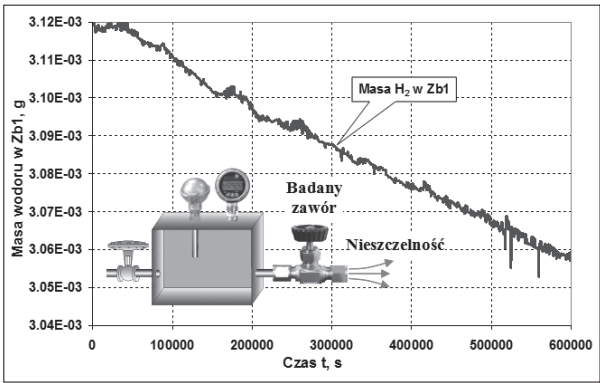
700 kPa do uzyskania wartości poniżej 400 kPa nie była właściwa.

Zatem, zmodyfikowana procedura badawcza (po wcześniejszym sprawdzeniu szczelności połączeń) rozpoczynała się od ustalenia w układzie ciśnienia

Rys. 6. Wyniki pomiaru parametrów termicznych podczas badania nieszczelności zaworu wodorowego z kształtką grzybkową K1  
Fig. 6. Results of thermal parameter measurements during leak testing of a hydrogen valve with a K1 poppet fitting



Rys. 7. Ubytek masy wodoru w zbiorniku Zb1 spowodowany nieszczelnością zaworu wodorowego z kształtką K1  
Fig. 7. Loss of hydrogen mass in tank Zb1 caused by a leak in the hydrogen valve with fitting K1



z przedziału definiowanego przez normę (400 kPa) i przebiegała ok. 7 dni, a badania dla każdej kształtki były parokrotnie powtarzane.

Na rys. 6 zaprezentowano wyniki pomiaru parametrów podczas badania nieszczelności wewnętrznej zaworu wodorowego z kształtką grzybkową K1. Jak można zauważyć w trakcie prowadzonych badań (7 dni) ciśnienie w zbiorniku Zb<sub>1</sub> spadło, a w zbiorniku Zb<sub>2</sub> nieznacznie wzrosło, co może sugerować dobrą szczelność materiału, z którego wykonano kształtkę zaworu. Dokładniejsza analiza zmiany ciśnienia (podczas procedury ba-

dawczej) wykazała, że w zbiorniku Zb<sub>1</sub> ciśnienie spadło o ok. 11,6 kPa, a w zbiorniku Zb<sub>2</sub> wzrosło o ok. 3,6 kPa.

Na podstawie zebranych danych badawczych (przy wykorzystaniu termicznego równania stanu) określono spadek masy wodoru w układzie pomiarowym, co przedstawiono na rys. 7. Uwzględniając spadek masy wodoru w Zb<sub>1</sub> i przyrost masy wodoru z Zb<sub>2</sub> oszacowano nieszczelność zaworu rozdzielającego Z<sub>3</sub> i zaworu badanego Z<sub>pom</sub>.

Dla przeprowadzonej serii badań zaworu wodorowego z kształtką K1 określono, że jego nieszczelność wyniosła ok. 0,029 dm<sup>3</sup>/rok.

W tej samej procedurze przeprowadzono badania dla kształtek K2 i K3, a wyniki odpowiednio wyniosły ok. 0,032 dm<sup>3</sup>/rok i 0,021 dm<sup>3</sup>/rok. Zestawienie wyników

badan dla rozważanych kształtek zaworów wodorowych przedstawiono w tab.2.

Tab.2. Nieszczelność zaworu badanego w zależności od zamontowanej kształtki grzybkowej  
Tab.2. Leakage of the tested valve depending on the installed poppet fitting

| Lp. | Oznaczenie kształtki | Kształtka                                                                             | Nieszczelność, dm <sup>3</sup> /rok |
|-----|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| 1   | K1                   |  | 0,029                               |
| 2   | K2                   |  | 0,032                               |
| 4   | K3                   |  | 0,021                               |

## Analiza wyników badań

Z porównania zastosowanych materiałów na kształtki K1, K2 i K3 zaworu wodorowego wynika, że najbardziej szczelny był zawór z kształtką K3, a najmniej z K2.

W wyniku analizy oszacowano, że nieszczelność K1 względem K3 jest wyższa o 38%, a nieszczelność K2 względem K3 jest większa o 52%.

Można stwierdzić, że przebadane materiały (a szczególnie kształtek K1 i K2) dość dobrze nadają się na grzybki zaworów wodorowych konstrukcyjnie dostosowanych do pełnienia funkcji zarówno regulacyjnej jak i odcinającej. Należy dodatkowo zauważyć, że materiał na kształtki K2 i K3 jest mniej plastyczny niż materiał kształtki K1, przez co zawór wodorowy z kształtką grzybkową K2 i K3 wymaga większego momentu dokręcenia w przypadku odcięcia przepływu. Kształtka K1 w zaworze, ze względu na swoją plastyczność, bardzo dobrze dopasowuje się do gniazda i już przy niewielkim momencie dokręcenia następuje właściwe doszczelnienie pola przepływu i odcięcie przepływu.

## Podsumowanie

Na podstawie badań laboratoryjnych sformułowano następujące spostrzeżenia:

- Do sterowania strumieniem wodoru z grupy zaworów grzybkowych najbardziej nadają się zawory z profilowanym grzybkiem, które zapewniają liniową charakterystykę regulacyjną.

- Opracowano i zaprezentowano autorską metodę pomiarową szczelności wewnętrznej zaworu wodorowego rozszerzającą możliwości uzyskania informacji w porównaniu z procedurą normową.
- Wykonano prototypowe, zaworowe elementy regulacyjne z materiałów kompozytowych z tworzywa sztucznego.
- Wykonano pomiary szczelności wewnętrznej zaworów regulacyjnych z uszczelnieniem tworzywa kompozytowego – metal. Z porównania zastosowanych materiałów na kształtki zaworowe (K1, K2 i K3) wynika, że najbardziej szczelny byłby zawór z kształtką K3, a najmniej z K2.
- Materiały kształtek K2 i K3 są mniej plastyczne niż materiał kształtki K1, przez co zawór wodorowy z tymi kształtkami wymaga większego momentu dokręcenia w przypadku odcięcia.
- Należałoby przeprowadzić dodatkowo badania szczelności wewnętrznej zaworu wodorowego (z różnym typem kształtek kompozytowych) w wyniku ich zużycia – może powstać zjawisko tzw. docierania kształtki i szczelność dla poszczególnych materiałów może ulec zmianie;
- Byłoby wskazane wykonanie badań uzupełniających wpływu czasu oddziaływania wodoru na materiał elementów zaworowych – jednakże badania takie nie należą do prostych, a przede wszystkim są bardzo czasochłonne. Najlepszym rozwiązaniem

byłoby, aby takie badania miały charakter przemysłowy a nie laboratoryjny.

## LITERATURA

- [1] [https://chemicalsafety.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p\\_card\\_id=1&p\\_version=1&p\\_lang=pl](https://chemicalsafety.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_card_id=1&p_version=1&p_lang=pl) [14-10-2025]
- [2] <https://www.iso.org/standard/56546.html> [14-10-2025]
- [3] Norma ISO 19880-1. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/71940/782d6a070c-284d72a0f6bb091e56ccf1/ISO-19880-1-2020.pdf> [14-10-2025]
- [4] Norma ISO 19880-3. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/64754/2dd6478fb0b146a-a9657250002002e18/ISO-19880-3-2018.pdf> [14-10-2025]
- [5] Norma EC79/2009 <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:035:0032:0046:en:PDF> [14-10-2025]
- [6] Polska Norma PN-EN 1349 – Armatura sterująca procesami przemysłowymi. PKN, Warszawa, 2005.
- [7] Polska Norma PN-IEC 60534-4 – Przemysłowe zawory regulacyjne. Część 4: Badania sprawdzające i rutynowe. PKN, Warszawa, 2001.
- [8] Tomeczek J.: Termodynamika. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1999.
- [9] Szargut J.: Termodynamika. Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa, 2000.
- [10] Tomeczek J., Puszer A. M., Wnęk M. – Uogólniona charakterystyka przepływowa zaworów grzybkowych. Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja Nr 9 (2008) 38-43.
- [11] Tomeczek J., Puszer A., Wnęk M.: Sposób kształtowania regulacyjnych charakterystyk przepływowych elementów nastawczych strumienia płynu. Pomiary Automatyka Kontrola Vol. 53, Nr 11 (2007) 38-43.
- [12] Wiśniowicz A.: Charakterystyki przepływowe armatury odcinającej. Gaz, Woda i Technika Sanitarna, Nr 4 (2004) 122-124.