



# Technologia TCD w analizatorach wodoru

Wodór stał się w ostatnich latach bardzo modnym i medialnym gazem. Za sprawą poszukiwania tzw. zielonych źródeł energii, wodór jest medium, w którym wielu upatruje przyszłość światowej energetyki. Nie każdy jednak ma świadomość, że wodór jest wykorzystywany w przemyśle od dekad, choć nie jest to wodór „zielony”. Bez względu na „kolor”, wodór jest gazem o specyficznych właściwościach, których monitorowanie jest kluczowe dla bezpieczeństwa i efektywności instalacji. Jedną z charakterystycznych właściwości wodoru wykorzystuje metoda pomiarowa TCD.



## CZAS WODORU

Wodór przestał być jedynie gazem specjalistycznym, wykorzystywanym w niszowych procesach. Dziś staje się fundamentem nowoczesnego przemysłu i krwiobiegem globalnej transformacji energetycznej. Jego obecność jest widoczna w całym łańcuchu wartości: od wielkoskalowej elektrolizy i ogniw paliwowych, przez rurociągi i magazyny, aż po tradycyjne rafinerie i zakłady petrochemiczne. Wraz z tą skalowalnością, infrastruktura wodorowa staje się naszą nową codziennością.

Dynamiczny rozwój technologii wodorowych wymusza ewolucję podejścia do analityki procesowej. Pomiar stężenia wodoru nie jest już wyłącznie zadaniem laboratoryjnym czy okazjonalną kontrolą jakości. Stał się on **funkcją inżynierską o krytycznym znaczeniu**, decydującą o bezpieczeństwie instalacji, precyzji sterowania i niezawodności całego układu.



## DLACZEGO POMIAR WODORU JEST TAK UCIAŹLIWY?

Specyficzne właściwości fizykochemiczne wodoru sprawiają, że zachowuje się on inaczej niż większość gazów. To generuje szereg wyzwań technicznych, z których najistotniejsze to:

- **wysoka dyfuzyjność** – jako najlżejszy pierwiastek, wodór przenika przez najmniejsze niedoskonałości, uszczelnienia i złącza,
- **zagrożenie pożarowe** – jest bezbarwny, bezwonny i pali się niewidocznym płomieniem. Charakteryzuje się przy tym szerokim zakresem palności i bardzo niską energią zapłonu,
- **zależności procesowe** – wynik pomiaru stężenia jest silnie skorelowany z ciśnieniem, temperaturą oraz zmiennym składem gazu tła.

W praktyce to nie sam czujnik bywa najstabszym ogniwem. Najwięcej niepewności wprowadzają czynniki instalacyjne: niewielkie nieszczelno-



### GRZEGORZ GRUSZKA

Absolwent Politechniki Śląskiej w Gliwicach, na Wydziale Automatyka, Elektronika i Informatyka, o specjalności Aparatura elektroniczna. W Introlu pracuje od 2005 roku, obecnie na stanowisku kierownika działu pomiarów fizykochemicznych.

tel. 32 789 00 63





ści, objętości martwe, adsorpcja na powierzchniach wewnętrznych czy kondensacja w układzie.



## DLACZEGO POMIAR WODORU MA KLUCZOWE ZNACZENIE?

W dobie transformacji energetycznej precyzyjny pomiar wodoru staje się warunkiem koniecznym dla bezpiecznego, wydajnego i przewidywalnego funkcjonowania przemysłu. Prawidłowo zaprojektowany system analityczny wspiera przedsiębiorstwa w pięciu kluczowych obszarach:

### 1. Bezpieczeństwo procesowe

To najważniejszy aspekt operacyjny. Pomiary pozwalają na natychmiastowe **wykrywanie wycieków**, weryfikację warunków przedmuchu (purge) oraz procesów inertyzacji. Są niezbędne do zapobiegania powstawaniu mieszanin wybuchowych i stanowią integralną część instrumentalnych funkcji bezpieczeństwa (SIF).

### 2. Jakość produktu i zgodność z normami

Monitorowanie czystości gazu oraz wykrywanie zanieczyszczeń pozwala na zachowanie ścisłej kontroli nad procesem. Jest to niezbędne do spełnienia rygorystycznych specyfikacji kontraktowych oraz wymogów regulacyjnych, które warunkują dopuszczenie produktu do rynku.

### 3. Efektywność operacyjna

Dokładne dane analityczne umożliwiają **optymalizację wydajności elektrolizerów** oraz maksymalizację wykorzystania ogniw paliwowych. Precyzyjne sterowanie procesami mieszania gazów bezpośrednio przekłada się na mniejsze zużycie energii i redukcję kosztów operacyjnych.

### 4. Niezawodna automatyzacja

Nowoczesne systemy sterowania (feed-forward i feedback) wymagają szybkich i powtarzalnych sygnałów. Stabilny pomiar jest funda-

mentem płynnej automatyzacji, eliminującym nieplanowane postoje i fluktuacje procesu.

## 5. Ochrona aktywów

Wczesne wykrywanie zmian w składzie gazu **zapobiega kruchości wodorowej**, zatruciem katalizatorów oraz innymi zakłóceniami procesowymi, które mogą prowadzić do kosztownych awarii sprzętu.



## SYSTEMY IN-SITU A SYSTEMY EKSTRAKCYJNE W POMIARZE WODORU

Systemy pomiaru wodoru można zasadniczo podzielić na konfiguracje typu **in-situ** oraz **ekstrakcyjne**.

W **systemie in-situ** analizator dokonuje pomiaru **bezpośrednio** w rurociągu procesowym lub zbiorniku. W tym przypadku element pomiarowy jest wystawiony na bezpośrednie działanie gazu procesowego, przy pełnym ciśnieniu roboczym i temperaturze procesu.

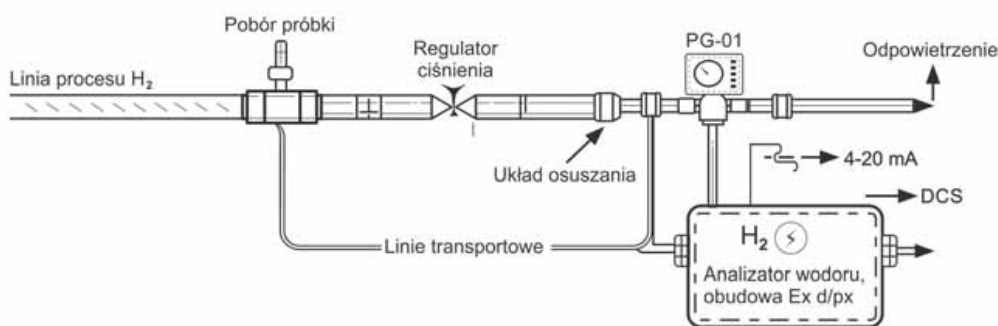
W **systemach ekstrakcyjnych** część gazu procesowego jest pobierana, a następnie transportowana systemem rurek i komponentów kondycjonujących do analizatora umieszczonego poza procesem.

Kluczowe różnice operacyjne występują przede wszystkim w dwóch obszarach. Jeśli chodzi o **dynamikę pomiaru** to metoda in-situ odzwierciedla stan procesu **w czasie rzeczywistym** przy minimalnym opóźnieniu. Systemy ekstrakcyjne, z uwagi na dokonywanie pomiaru na obejściu (bypassie), wprowadzają czas transportu próbki, dodatkowe potencjalne drogi wycieku oraz zmiany ciśnienia i temperatury, przed dokonaniem analizy. Pomiar ten ma zatem określone opóźnienie względem stanu rzeczywistego i jest pomiarem okresowym, a nie ciągłym. W przypadku dynamiki pomiaru, systemy in-situ mają więc przewagę nad pomiarem ekstrakcyjnym.

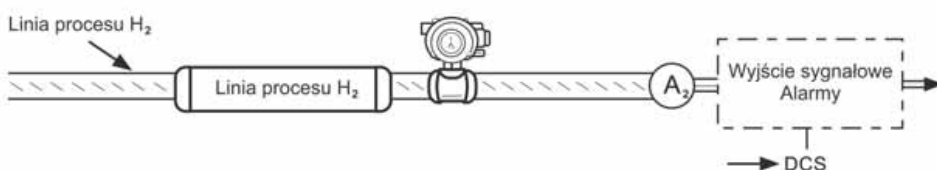
Systemy ekstrakcyjne wygrywają za to z in-situ w zakresie **ochrony i elastyczności** – oferują większą elastyczność i chronią analizator przed trudnymi warunkami procesowymi. Wymagają jednak starannego projektowania w celu wyeliminowania objętości martwych, kondensacji oraz zapewnienia reprezentatywności próbki.

W instalacjach wodorowych wybór między pomiarem in-situ, a ekstrakcyjnym ma bezpośredni wpływ na **czas odpowiedzi, bezpieczeństwo, koszty utrzymania oraz integralność całego systemu**. Warto jednak zaznaczyć, że kwestie te są znacznie bardziej złożone niż tylko rodzaj systemu i miejsce pomiaru. Decyzja o wyborze zawsze musi wynikać ze specyficznych wymagań danej aplikacji, a nie tylko z sa-

Ekstrakcyjny system poboru próbki



In-situ analizator wodoru

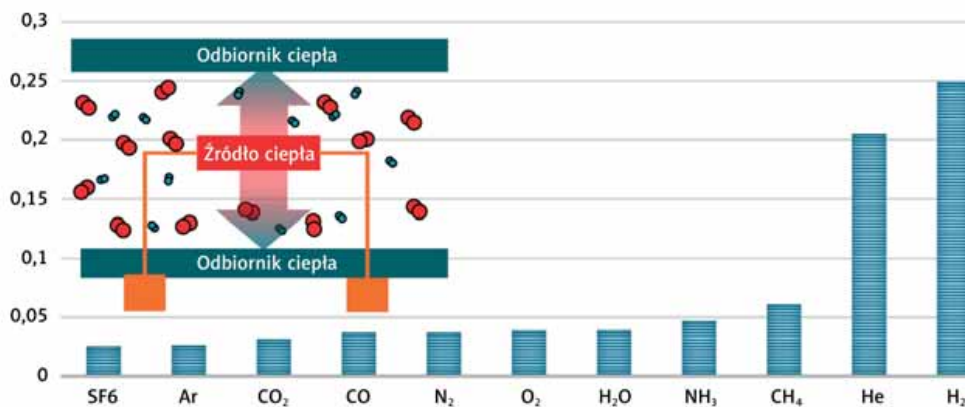


Rysunek 1 Schematy systemu ekstrakcyjnego i systemu in-situ w pomiarach wodoru

„Analizator TCD zamontowany bezpośrednio w procesie, mierzy wymianę ciepłą i na jej podstawie określa stężenie w czasie rzeczywistym.



Właściwa przewodność cieplna gazów w temperaturze 200°C, [W/(m·k)]

Rysunek 2  
Wykres przewodności cieplnej gazów

mych możliwości technicznych takiego czy innego czujnika (układu).

gdzie stężenia wodoru są wysokie, a skład gazu tła pozostaje stosunkowo stabilny.



## TECHNOLOGIA TCD W ANALIZATORACH WODORU IN-SITU

Pozostawiając wybór metody pomiarowej innym, chciałbym skupić się na tej bardziej bezpośredniej, czyli **analizatorach wodoru in-situ**. Detektory termokonduktometryczne (TCD) mierzą stężenie wodoru, wykorzystując jego wyjątkowo **wysoką przewodność cieplną** w stosunku do większości innych gazów. W skrócie – analizator wodoru TCD określa zawartość wodoru na podstawie zmian w wymianie ciepła między podgrzewanym elementem pomiarowym, a otaczającym go gazem.

Ponieważ przewodność cieplna wodoru jest znacznie wyższa niż w przypadku azotu, argonu, metanu czy większości gazów przemysłowych, technologia TCD stała się najpowszechniej stosowaną metodą przemysłową do pomiaru stężenia i czystości tego gazu.

Wykorzystanie zjawiska przewodności cieplnej w urządzeniach montowanych bezpośrednio w liniach procesowych (in-situ) pozwala na osiągnięcie wysokiej czułości i powtarzalności pomiarów. Specyfika detekcji typu TCD zapewnia czujnikom wodoru niezwykle szeroki zakres dynamiczny, co przekłada się na wysoką elastyczność aplikacyjną:

- **pomiary śladowe (ppm)** – wykorzystywane m.in. w monitoringu bezpieczeństwa przy procesach elektrolizy, gdzie detekcja minimalnych ilości wodoru w gazach procesowych jest krytyczna dla ochrony instalacji,
- **wysokie stężenia (do 100%)** – stosowane przy kontroli czystości gazu w procesach wielkoskalowych, takich jak reforming parowy metanu (SMR) czy synteza amoniaku.

Zalety metody TCD sprawiają, że analizatory TCD są standardowo wdrażane w systemach produkcji wodoru — w szczególności w **elektrolizerach, jednostkach reformingu oraz układach oczyszczania PSA** (adsorpcja zmiennociśnieniowa). Sprawdzają się najlepiej wszędzie tam,



## PROCES POMIARU WODORU METODĄ TCD

Fundamentem działania sensora typu **TCD** jest precyzyjny pomiar dynamiki wymiany ciepła między elementem pomiarowym, a przepływającym medium. Konstrukcja detektora opiera się na podgrzewanym włóknie o wysokiej czułości termicznej (źródło ciepła), które jest zawieszony w komorze pomiędzy elementami odprowadzającymi energię cieplną.

Proces pomiarowy przebiega w następujących etapach:

- **transfer ciepła** – gdy gaz procesowy przepływa wokół włókna, stopień odprowadzania z niego energii zależy bezpośrednio od przewodnictwa cieplnego mieszaniny,
- **wpływ wodoru** – ze względu na unikalne właściwości fizyczne wodoru, wzrost jego stężenia w gazie tła powoduje gwałtowne przyspieszenie odprowadzania ciepła i silniejsze schłodzenie elementu pomiarowego,
- **korelacja elektryczna** – zmiana temperatury włókna wywołuje proporcjonalną zmianę jego **oporności elektrycznej**. Parametr ten jest mierzony z wysoką rozdzielczością,
- **analiza stężenia** – zmierzona różnica potencjałów jest przeliczana na ułamek molowy wodoru, co pozwala na precyzyjne określenie jego stężenia **w czasie rzeczywistym**.

W największym skrócie – analizator TCD zamontowany **bezpośrednio w procesie**, mierzy wymianę cieplną i na jej podstawie określa stężenie w danym momencie, w czasie rzeczywistym. Metoda ta zapewnia tym samym **ciągły monitoring stężenia** reagując natychmiastowo na wahania.



## OGRANICZENIA I WYZWANIA TECHNOLOGICZNE

Mimo swojej popularności, technologia TCD posiada specyficzne uwarunkowania, które mu-

”Metoda in-situ odzwierciedla stan procesu w czasie rzeczywistym przy minimalnym opóźnieniu.



Rysunek 3  
Układ analizatora wodoru in-situ MOD-1060



Rysunek 4  
Czujnik analizatora wodoru MOD-1060

„Czujniki w technologii TCD mierzą stężenie wodoru, wykorzystując jego wyjątkowo wysoką przewodność cieplną w stosunku do większości innych gazów.

szą być uwzględnione na etapie projektowania systemu:

- **nieselektywna zasada pomiaru** – detektor reaguje na całkowitą przewodność cieplną mieszaniny, a nie bezpośrednio na cząsteczki wodoru,
- **czułość skrośna** – zmiany stężenia innych gazów o różnej przewodności cieplnej wpływają na wynik pomiaru,
- **spadek dokładności w układach wieloskładnikowych** – w strumieniach o zmiennym składzie gazu tła precyzja analizy ulega pogorszeniu,

Zakres pomiarowy H <sub>2</sub>	Typowe procesy / Cel pomiaru
0 – 1%	Monitorowanie śladowych ilości wodoru w celach bezpieczeństwa i wykrywania wycieków w gazie obojętnym lub procesowym (detekcja bardzo niskich poziomów H <sub>2</sub> jako wczesne ostrzeżenie).
0 – 5%	Niskie stężenia H <sub>2</sub> w strumieniu tlenu, stosowane do krytycznego monitoringu bezpieczeństwa (np. na wylocie O <sub>2</sub> z elektrolizera) w celu uniknięcia tworzenia mieszanin wybuchowych.
0 – 10%	Wodór w gazie z końcowego etapu reformingu, gazie syntezowym lub mieszaninach N <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> , gdzie H <sub>2</sub> jest składnikiem mniej znaczącym.
0 – 30%	Średnie stężenia H (np. w gazie z częściowego utleniania, niektórych składach gazu syntezowego), gdzie H <sub>2</sub> jest jednym z głównych składników.
0 – 100%	Strumienie wysokiej czystości wodoru, obejmujące pomiary od 60–80% aż do 100% H <sub>2</sub> (czysty produkt wodorowy, magazynowanie, gaz recyrkulacyjny itp.).

Tabela 1  
Zakresy pomiarowe i zastosowanie analizatora wodoru MOD-1060

- **wymóg stabilnego tła** – skuteczna praca urządzenia wymaga dobrze zdefiniowanego i stałego składu pozostałych komponentów mieszaniny.

W praktyce powyższe ograniczenia sprowadzają się przede wszystkim do tego, że każda zmiana w gazie tła – taka jak **przebiecie metanu**, przedostanie się azotu czy zanieczyszczenie tlenem – może wprowadzić błąd pomiarowy. W celu uniknięcia błędów, konieczne jest odpowiednie skonfigurowanie systemu do kompensacji tych zmian. Tutaj warto zaznaczyć, że rozwiązania firmy MODCON minimalizują wpływ ograniczeń pomiarowych, dzięki zastosowaniu algorytmów sztucznej inteligencji.



## ANALIZATOR WODORU MOD-1060

Przykładem analizatora pracującego w oparciu o metodę TCD jest **analizator wodoru MOD-1060** firmy MODCOM. Dzięki wysokiej elastyczności detekcji TCD, analizator ten może być precyzyjnie dostosowany do specyfiki danego węzła technologicznego.

Analizator wodoru MOD-1060 może być skonfigurowany dla różnych przedziałów pomiarowych w zależności od zastosowania i branży. Typowe konfiguracje analizatora przedstawia Tabela 1.



## WODÓR NIE WYBACZA BŁĘDÓW

Czasami spotykamy się z projektami, w których pomiar wodoru jest traktowany po macoszemu, jedynie jako kolejny element oprzyrządowania na długiej liście zakupowej. W rzeczywistości jednak, ze względu na swoje właściwości, wodór to gaz wyjątkowo niebezpieczny i trudny do okietzania. Właśnie dlatego, w dobie rozwoju i upowszechniania technologii produkcji i wykorzystania wodoru, jego skuteczna i dokładna kontrola powinna być traktowana raczej jako cała dyscyplina umożliwiająca bezpieczną eksploatację. Nowoczesna analityka, oparta o różne metody pomiarowe, jest w tym procesie nie tylko narzędziem dostarczającym informacji, ale przede wszystkim jest podstawą **aktywnego systemu ochrony aktywów i ludzi**.