

## Numeryczny model wykonywania predykcji zapotrzebowania na gaz odbierany z podziemnych magazynów gazu

### Numerical model for predicting demand for gas received from underground gas storage facilities

Tadeusz Kwilosz, Bogdan Filar, Agnieszka Moska, Mariusz Miziołek

*Institut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy*

**STRESZCZENIE:** Zadaniem operatora systemu magazynowania gazu jest zarządzanie podziemnymi magazynami gazu. Do jego głównych zadań należy zapewnienie bezpieczeństwa funkcjonowania instalacji magazynowych<sup>(\*)</sup> i realizacji umów z użytkownikami tych instalacji oraz świadczenie usług magazynowania niezbędnych do prawidłowego funkcjonowania systemu gazowego. Kolejnym ważnym zadaniem operatora systemu magazynowania gazu jest zarządzanie przepływami paliw gazowych kierowanych do instalacji magazynowej. Należy dodać też obowiązek informowania użytkowników systemu oraz operatorów innych systemów o warunkach świadczenia usług magazynowania paliw gazowych. W celu zapewnienia możliwości bezpiecznego realizowania usług magazynowych niezbędne jest wykonywanie wielodniowych predykcji mocy zatłaczania gazu do magazynu i odbioru gazu z magazynu na każdym etapie jego napełnienia. Przygotowywanie tak określonych predykcji możliwe jest przy użyciu numerycznych modeli takich jak: modele symulacyjne pracy magazynu gazu, modele numeryczne wykonane na podstawie charakterystyk pracy magazynu gazu. Wykorzystanie modelu pracy magazynu gazu opartego na charakterystykach jego pracy daje możliwość szybkiego wykonania predykcji mocy. W artykule zaprezentowano model numeryczny pracy magazynu gazu opracowany na podstawie charakterystyk mocy odbioru i zatłaczania gazu. Oprogramowanie modelu zostało wykonane przy użyciu języka programowania Python. Na tym etapie program był uruchamiany w środowisku programistycznym. Opracowany model został przetestowany na przykładowych zestawach danych. Wykonano dwie predykcje mocy odbioru gazu i dwie predykcje mocy zatłaczania gazu. Predykcje przygotowano przy założeniu eksploatacji magazynu gazu na jego wczesnym i zaawansowanym etapie napełnienia. Wszystkie predykcje dotyczyły 20-dniowego okresu pracy magazynu. W przypadku każdej z wykonanych predykcji zastosowano 6 wariantów zmiany ciśnienia w trakcie pracy magazynu gazu.

<sup>(\*)</sup> Instalacja magazynowa paliw gazowych to system służący do przechowywania paliw gazowych, obejmujący zarówno naziemne i podziemne zbiorniki, jak i magazyny w kawernach solnych czy szcerpanych złożach węglowodorów.

Słowa kluczowe: magazynowanie gazu, predykcje, modelowanie numeryczne.

**ABSTRACT:** The task of the gas storage system operator is to manage underground gas storage facilities. Its main tasks include ensuring the safe operation of storage installations<sup>(\*)</sup> and the implementation of agreements with users of these installations, as well as providing storage services necessary for the proper functioning of the gas system. Another important task of the gas storage operator is to manage the flows of gaseous fuels directed to the storage installation. It is also necessary to add the obligation to inform system users and operators of other systems about the conditions of providing gaseous fuel storage services. In order to ensure the safe provision of storage services, it is necessary to perform multi-day predictions of gas injection power into the storage facility and gas withdrawal power from the storage facility at each stage of its filling. Preparing such predictions is possible using numerical models, such as simulation models of gas storage operation and numerical models developed on the basis of the operating characteristics of a gas storage facility. The use of a gas storage operation model based on its operating enables rapid prediction of power. This article presents a numerical model of gas storage operation developed on the basis of gas withdrawal and injection power characteristics. The model software was developed using the Python programming language. At this stage, the program was run in a programming environment. The developed model was tested on sample data sets. Two predictions of gas withdrawal capacity and two predictions of gas injection power were made. The predictions were prepared assuming the operation of the gas storage facility was at an early and advanced stage of filling. All predictions concerned a 20-day period of storage operation. For each of the predictions made, 6 variants of pressure changes during the gas storage facility operation were used.

<sup>(\*)</sup>A gas storage installation is a system used to store gaseous fuels, including both above-ground and underground tanks, as well as storage facilities in salt caverns or depleted hydrocarbon reservoirs.

Key words: gas storage, predictions, numerical modeling.

#### Literatura

- Agate G., Colucci F., Guandalini R., Moia F., Pagotto R., Crosta G.B., 2017. A Numerical Modeling Approach to Investigate the Safety Aspects of the Gas Storage in a Deep Geological Reservoir. *Proceedings of the Offshore Mediterranean Conference and Exhibition, Ravenna, Italy*: 29–31.
- Brkić V., Zelenika I., Mijić P., Medved I., 2021. Underground Gas Storage Process Optimisation with Respect to Reservoir Parameters and Production Equipment. *Energies*, 14: 4324. DOI: 10.3390/en14144324.
- Danel R., Otte L., Vancura V., Repka M., 2013. Monitoring and balance of gas flow in underground gas storage. *Procedia Earth and Planetary Science*, 6: 485–491. DOI: 10.1016/j.proeps.2013.01.063.
- Filar B., Miziołek M., Cicha-Szot R., Moska A., Kwilosz T., Szpunar T., 2014. Analiza możliwości zwiększenia pojemności czynnej podziemnych magazynów gazu w Polsce. *Nafta-Gaz*, 9: 571–580. DOI: 10.18668/ng.2024.09.05.
- Gas Storage Poland – działalność. <<https://ipi.gasstoragepoland.pl/pl/menu/o-nas/#dzialalnosc>> (dostęp: 12.05.2025).

- Kuncir M., Chang J., Mansdorfer J., Dougherty E., 2003. Analysis and Optimal Design of Gas Storage Reservoirs. *Proceedings of the SPE Eastern Regional/AAPG Eastern Section Joint Meeting, Pittsburgh, PA, USA*: 6–10. DOI: 10.2118/84822-MS.
- Kwilosz T., 2018. Algorytm prognozowania i optymalizacji kosztów sprężania gazu podczas eksploatacji PMG. *Nafta-Gaz*, 12: 938–943. DOI: 10.18668/NG.2018.12.08.
- Malakootia R., Azin R., 2011. The optimization of underground gas storage in a partially 21 depleted gas reservoir. *Petroleum Science and Technology*, 29(8): 824–836. DOI: 10.1080/10916460903486742.
- McVay D.A., Spivey J., 2001. Optimizing Gas-Storage Reservoir Performance. *SPE Reserv. Eval. Eng.*, 4: 173–178. DOI: 10.2118/28639-MS.
- Moradi B., 2009. Study of Gas Injection Effects on Rock and Fluid of a Gas Condensate Reservoir during Underground Gas Storage Process. *Proceedings of the Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Port of Spain, Trinidad and Tobago*: 14–15. DOI: 10.2118/121830-MS.
- Moska A., 2022. Różnicowanie się ciśnienia złożowego w PMG jako wskaźnik obecności niezidentyfikowanych elementów strukturalnych. *Nafta-Gaz*, 11: 805–814. DOI: 10.18668/NG.2022.11.04.
- Paliński A., 2018. Hurtownie danych i eksploracja danych w prognozowaniu popytu na gaz i usługi magazynowania gazu. *Nafta-Gaz*, 4: 283–289. DOI: 10.18668/NG.2018.04.04.
- Shin C.H., Lee J.H., 2011. A Numerical Study on the Compositional Variation and the Validity of Conversion of a Gas Condensate Reservoir into Underground Storage. *Energy Sources Part A Recovery Util. Environ. Eff.*, 33: 1921–1932. DOI: 10.1080/15567036.2010.527906.
- Song X., Peng C., Li G., Wen K., 2016. A Probabilistic Model to Evaluate the Operation Reliability of the Underground System in Underground Gas Storage Transformed from Depleted Gas Reservoir. *Proceedings of the International Petroleum Technology Conference, Bangkok, Thailand*, 14–16. DOI: 10.2523/IPTC-18664-MS.
- Tanbhir A.A., Monir M.U., Hossain M.J., 2024. Underground natural gas storage. [W:] Rahimpour M.R., Makarem M.A., Meshksar M. (red.). *Advances in Natural Gas: Formation, Processing, and Applications. Volume 6: Natural Gas Transportation and Storage*. Elsevier, Amsterdam: 125–146.

---

**Nafta-Gaz 2026, tom 82, nr 3, s. 205–212, DOI: 10.18668/NG.2026.03.02**

## Wpływ korozji węglanowej związanej z sekwestracją CO<sub>2</sub> na stwardniałe zaczyny cementowe otrzymywane z zaczynów uszczelniających o niskiej gęstości

The effect of carbonate corrosion associated with CO<sub>2</sub> sequestration on hardened cement slurries obtained from low-density sealing slurries

Łukasz Kut

*Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy*

**STRESZCZENIE:** Na całym świecie podejmowane są działania mające na celu ograniczenie emisji dwutlenku węgla do atmosfery poprzez wdrażanie coraz nowszych rozwiązań i technologii. Jednym ze sposobów ograniczających emisję CO<sub>2</sub> do atmosfery jest jego sekwestracja (składowanie pod ziemią). Technologia użyta do tego procesu zwana jest technologią CCS, która polega na wychwytywaniu CO<sub>2</sub> z instalacji przemysłowych, transportowaniu go do miejsca składowania oraz wtłoczeniu do wgłębnych struktur geologicznych. Zabiegi uszczelniające zarówno w płytkich, jak i bardzo głębokich otworach wiertniczych wymagają zastosowania specjalnie opracowanych receptur zaczynów cementowych odpornych na specyficzne warunki panujące na ich dnie. Bardzo istotne jest, aby zastosowany zaczyn cementowy posiadał odpowiednie parametry technologiczne oraz czasy gęstnienia i wiązania zapewniające bezpieczne jego zatłoczenie na dno otworu wiertniczego. Zaczyny cementowe powszechnie stosowane po zastosowaniu w otworach sekwestracyjnych pod wpływem rozpuszczonego w wodzie CO<sub>2</sub> mogą ulegać tzw. korozji węglanowej. Dlatego uszczelnianie otworów przeznaczonych do magazynowania dwutlenku węgla wymaga, by użyte zaczyny cementowe odznaczały się podwyższoną odpornością na korozję węglanową w długim okresie. Korozja węglanowa wpływa na parametry mechaniczne stwardniałych zaczynów cementowych w różnym stopniu oraz tempie, w zależności od zastosowanych składników, stosunku wodno-cementowego oraz warunków otworowych: temperatury i ciśnienia. Celem badań laboratoryjnych była analiza wpływu korozji węglanowej na zmiany parametrów technologicznych stwardniałych zaczynów cementowych otrzymywanych z zaczynów o niskiej gęstości, tzw. lekkich. Przebadane zostały receptury zaczynów cementowych, które mogą być zastosowane przez serwisy cementacyjne do uszczelniania górnych odcinków kolumn rur okładzinowych w otworach wiertniczych. Badania były realizowane przy zastosowaniu cementów oraz pozostałych środków powszechnie stosowanych do sporządzania receptur płynnych zaczynów cementowych. Prowadzono badania parametrów technologicznych stwardniałych zaczynów cementowych po założonych okresach do 9 miesięcy od sporządzenia próbek. Po każdym okresie badań (3, 6 i 9 miesięcy) przeprowadzona została analiza wpływu korozji węglanowej na zmiany parametrów mechanicznych stwardniałych zaczynów cementowych w czasie. Otrzymywane wyniki badań laboratoryjnych wykazywały negatywny wpływ dwutlenku węgla na parametry technologiczne stwardniałych zaczynów cementowych oraz stopniowe osłabianie ich struktury i wytrzymałości. Z opracowanych receptur zaczynów cementowych sporządzono próbki stwardniałych zaczynów cementowych. Zaczyny cementowe wiązały przez 48 godzin w ustalonej temperaturze i ciśnieniu (warunki otworopodobne). Otrzymane próbki poddano badaniu: wytrzymałości na ściskanie, wytrzymałości na zginanie, przyczepności do rur stalowych.

**Słowa kluczowe:** zaczyn cementowy, stwardniały zaczyn cementowy, parametry reologiczne, parametry mechaniczne, parametry technologiczne, dwutlenek węgla, otwory sekwestracyjne.

**ABSTRACT:** Around the world, efforts are being made to reduce carbon dioxide emissions into the atmosphere by introducing increasingly innovative methods. One way to reduce CO<sub>2</sub> emissions is through sequestration (underground storage). The technology used for this process,

called CCS, involves capturing CO<sub>2</sub> from industrial installations, transporting it to a storage site, and injecting it into subsurface geological structures. Sealing procedures in both shallow and very deep boreholes require the use of specially developed cement slurries that are resistant to the specific conditions at the bottom. It is crucial that the cement slurry used has the appropriate technological parameters and thickening and setting times to ensure its safe injection to the bottom of the borehole. Cement slurries commonly used in sequestration wells can be susceptible to so-called “carbonate corrosion” when exposed to CO<sub>2</sub> dissolved in water. Therefore, sealing wells intended for carbon dioxide storage requires the cement slurries to demonstrate increased resistance to long-term carbonate corrosion. Carbonate corrosion affects the mechanical properties of hardened cement slurries to varying degrees and rates, depending on the ingredients used, the water-cement ratio, and the well conditions: temperature and pressure. The aim of the laboratory research was to analyze the effect of carbonate corrosion on changes in the technological parameters of hardened cement slurries obtained from low-density, so-called “light” slurries. Formulations of cement slurries were tested, which could be used by cementing companies to seal the upper sections of casing strings in boreholes. The research was conducted using cements and other agents commonly used to prepare liquid cement slurry formulations. During the project, the technological parameters of hardened cement slurries were tested after predetermined periods of up to 9 months from sample preparation. After each test period (3, 6, and 9 months), an analysis was conducted of the impact of carbonate corrosion on the changes in the mechanical parameters of hardened cement slurries over time. The laboratory test results demonstrated a negative impact of carbon dioxide on the technological parameters of hardened cement slurries, and a gradual weakening of their structure and strength. Samples of hardened cement slurries were prepared from the developed cement slurry recipes. The cement slurries set for 48 hours at the specified temperature and pressure (wellbore-like conditions). The resulting samples were tested for: compressive strength, bending strength, adhesion to steel pipes.

Key words: cement slurry, hardened cement slurry, rheological parameters, mechanical parameters, technological parameters, carbon dioxide, sequestration wellbores.

## Literatura

- Dębińska E., 2012. Ocena działania dodatków opóźniających czas wiązania zaczynów cementowych na podstawie badań laboratoryjnych. *Nafta-Gaz*, 4: 225–232. <<https://inig.pl/magazyn/nafta-gaz/NAFTA-GAZ-2012-04-02.pdf>> (dostęp: 17.06.2026).
- Kremieniewski M., 2020. Analiza parametrów technologicznych wybranych zaczynów lekkich stosowanych do uszczelniania płytkich otworów o temperaturze do 45°C. *Nafta-Gaz*, 10: 710–718. DOI: 10.18668/NG.2020.10.06.
- Kremieniewski M., Kędziński M., 2020. Wpływ wybranych domieszek obniżających gęstość na parametry zaczynu cementowego. *Nafta-Gaz*, 3: 143–153. DOI: 10.18668/NG.2020.03.01.
- Kremieniewski M., Pikłowska A., 2020. Receptura zaczynu lekkiego do uszczelniania otworów w strefie niskich ciśnień złożowych. *Nafta-Gaz*, 9: 577–584. DOI: 10.18668/NG.2020.09.03.
- Kremieniewski M., Rzepka M., 2009. Wpływ procesu ogrzewania na reologię modyfikowanych zaczynów cementowych. *Nafta-Gaz*, 10: 775–781. <<https://inig.pl/magazyn/nafta-gaz/NAFTA-GAZ-2009-10-05.pdf>> (dostęp: 17.06.2026).
- Lubaś J., Krępulec P., 2005. Polski przemysł naftowy pionierem sekwestracji CO<sub>2</sub> w Europie. *Konferencje i referaty, Szejki, lipiec 2005*.
- Rzepka M., Kątna Z., 2006. Zaczyny cementowe z dodatkiem mikrocementu do uszczelniania rur okładzinowych w warunkach wysokich temperatur i ciśnień złożowych. *Nafta-Gaz*, 7–8: 364–369.
- Rzepka M., Kędziński M., 2022. Badania statycznej wytrzymałości strukturalnej zaczynów cementowych o obniżonej gęstości przeznaczonych do uszczelniania otworów wiertniczych. *Nafta-Gaz*, 3: 197–207. DOI: 10.18668/NG.2022.03.04.
- Rzepka M., Kremieniewski M., 2017. Zaczyny cementowe do uszczelniania głębokich otworów wiertniczych. *Oil and Gas Engineering, Poltava National Technical University*, 2: 43–56. <<https://journals.nupp.edu.ua/oge/issue/view/14/4#page=50>> (dostęp: 17.06.2026).
- Tarkowski R., Stopa J., 2007. Szczelność struktury geologicznej przeznaczonej do podziemnego składowania dwutlenku węgla. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 23(1):129–137.
- Uliasz-Bocheńczyk A. (red.), 2012. Zaczyny cementowe w technologiach wiertniczych geologicznego składowania CO<sub>2</sub>. *Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków*.

## Akty normatywne

- PN-EN ISO 10426-1 Przemysł naftowy i gazowniczy – Cementy i materiały do cementowania otworów – część 1: Specyfikacja.
- PN-EN ISO 10426-2 Przemysł naftowy i gazowniczy – Cementy i materiały do cementowania otworów – część 2: Badania cementów wiertniczych.

---

**Nafta-Gaz 2026, tom 82, nr 3, s. 213–224, DOI: 10.18668/NG.2026.03.03**

## Zaczyny cementowe z dodatkiem nanomateriałów do uszczelniania rur w podziemnych magazynach wodoru zlokalizowanych w kawernach solnych

Cement slurries with the addition of nanomaterials for sealing casing in underground hydrogen storage facilities located in salt caverns

Miłosz Kędziński, Marcin Rzepka

*Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy*

**STRESZCZENIE:** W artykule przedstawiono wyniki badań nad wpływem nanomateriałów na właściwości płynnych i stwardniałych zaczynów cementowych do podziemnego magazynowania wodoru w kawernach solnych. Badania laboratoryjne były wykonywane w INiG – PIB, w Laboratorium Zaczynów Uszczelniających. W badanych zaczynach cementowych jako spoiwo wiążące zastosowano cement wiertniczy G. Zaczyny cementowe sporządzano na solance o pełnym nasyceniu o gęstości 1200 kg/m<sup>3</sup>, ze względu na bezpośrednią obecność soli w otworze. Do solanki dodawano kolejno środki: odpieniający, upłynniający i obniżający filtrację. Nanokomponenty (nano-SiO<sub>2</sub>, nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, nano-ZnO, nanorurki węglowe) dodawano do wody zarobowej i dyspergowano ją przy użyciu sonifikatora. Pozostałe składniki: mikrocement, gips modelowy oraz cement mieszano ze sobą i wprowadzano następnie do wody zarobowej. Dla zaczynów cementowych wykonywano badania parametrów reologicznych, określano gęstość, rozlewność, czas gęstnienia, odstój wody oraz zmiany objętości (pęcznienie). Następnie wykonywano badania wytrzymałości na ściskanie kamieni cementowych po 7 dniach oraz po 1, 3 i 6 miesiącach wiązania zaczynów. Dla powstałych kamieni cementowych przeprowadzono także badanie porowatości kamienia cementowego po 6 miesiącach deponowania w nasyconej solance. Badane zaczyny cementowe posiadały gęstość 1920 kg/m<sup>3</sup>. Zaczyny charakteryzowały się odpowiednią reologią. Zaczyny cementowe po czasie 7 godzin były płynne i nie osiągały początku gęstnienia, dzięki czemu mogą być bezpiecznie zatłaczane podczas cementowania kolumny rur okładzinowych. Odstój wody był zerowy (nie zanotowano wolnej wody). Dodatek gipsu modelowego do składów zaczynów cementowych wpływał na zwiększenie ich pęcznienia podczas wiązania. Zmiany objętościowe (pęcznienia) były dodatnie. Wszystkie badane próbki kamieni cementowych wraz z upływem czasu odznaczały się wzrostem wytrzymałości na ściskanie. Wprowadzenie nanomateriałów do receptur zaczynów cementowych wpłynęło pozytywnie na wzrost wytrzymałości na ściskanie kamieni cementowych. Dodatek nanokomponentów do receptur zaczynów cementowych wpłynął na spadek porowatości kamieni cementowych oraz zagęszczenie mikrostruktury matrycy cementowej.

Słowa kluczowe: kawerny solne, zaczyn cementowy, podziemny magazyn wodoru, energia odnawialna, mikrocement, nanomateriały.

**ABSTRACT:** This article presents the results of research on the effect of nanomaterials on the properties of liquid and hardened cement slurries for underground hydrogen storage in salt caverns. Laboratory tests of cement slurries were conducted at the Oil and Gas Institute – National Research Institute in the Cement Slurry Laboratory. Cement slurries were prepared on the basis of class G drilling cement. Cement slurries were prepared on fully saturated brine with a density of 1200 kg/m<sup>3</sup> due to the direct presence of salt in the wellbore. The following agents were added to the brine: defoamers, liquefying agents and fluid loss control. Nanocomponents (nano-SiO<sub>2</sub>, nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, nano-ZnO, carbon nanotubes) were added to the mixing water and dispersed using a sonicator. The remaining ingredients: microcement, model gypsum and cement were mixed together, and then added to the mixing water. Rheological parameters were tested for the cement slurries, determining density, flow, thickening time, free water and volume change (swelling). Compressive strength tests were then performed after 7 days, 1, 3, and 6 months. For the cement stones, porosity testing was performed after 6 months of exposure in saturated brine. The tested cement slurries had a density of 1920 kg/m<sup>3</sup>. The slurries were characterized by good rheological properties. After 7 hours, the cement slurries were fluid and had not reached the beginning of thickening, allowing them to be safely injected during cementing of the casing string. Water separation was zero (no free water was observed). The addition of gypsum to the cement slurry formulations increased their swelling during setting. Volumetric changes (swelling) were positive. All tested cement stone samples showed an increase in compressive strength over time. The addition of nanomaterials to the cement slurry formulations positively influenced the increase in compressive strength of the cement stones. The addition of nanocomponents to the cement slurry formulations reduced the porosity of the cement stones and densified the microstructure of the cement matrix.

Key words: salt caverns, cement slurry, underground hydrogen storage, renewable energy, microcement, nanomaterials.

## Literatura

- Aftab A., Hassanpouryouzband A., Martin A., Kendrick J., Thaysen E., Heinemann N., Utley J., Wilkinson M., Haszeldine R.S., Edlmann K., 2023. Geochemical Integrity of Wellbore Cements during Geological Hydrogen Storage. *Environmental Science & Technology Letters*, 10(7): 551–556. DOI: 10.1021/acs.estlett.3c00303.
- Al-Yaseri A., Fatah A., Zeng L., Al-Ramadhan A., Sarmadivaleh M., Xie Q., 2023. On hydrogen-cement reaction: Investigation on well integrity during underground hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(91): 35610–35623. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.05.304.
- Audigane P., Bader A.G., Gentier S., Beccalotto L., Bellenfant G., 2014. The role of the underground for massive storage of energy: a preliminary glance of the French case. *EGU General Assembly, Vienne, Austria*. <<https://hal-brgm.archives-ouvertes.fr/hal-00968155>> (dostęp:.....)
- Bai M., Song K., Sun Y., He M., Li Y., Sun J., 2014. An overview of hydrogen underground storage technology and prospects in China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 124: 132–136. DOI: 10.1016/j.petrol.2014.09.037.
- Boersheim E.C., Reitenbach V., Albrecht D., Pudlo D., Ganzer L., 2019. Experimental Investigation of Integrity. *SPE Europe featured at 81st EAGE Conference and Exhibition, London, England, UK, June 2019*. SPE-195555-MS. DOI: 10.2118/195555-MS.
- Buczyńska M., Wiśniowski R., Stryczek S., 2017. The influence of hydrogen on physical properties of cement stone sealing casing in underground hydrogen storage in salt caverns. *17<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM; Sofia, 2017*. DOI:10.5593/sgem2017H/15.
- Bünger U., Michalski J., Crotogino F., Kruck O., 2016. Large-scale underground storage of hydrogen for the grid integration of renewable energy and other applications. [W:] Ball M., Basile A., Veziroğlu T.N. (red.). *Compendium of Hydrogen Energy*, 133–163. DOI: 10.1016/B978-1-78242-364-5.00007-5.
- Cracolici F., Iorio V., Parrozza F., Luigina M., Previde M., 2023. Experimental Investigation of Cement Compatibility in Underground Hydrogen Storage in Depleted Reservoir. *International Petroleum Technology Conference, Bangkok, Thailand, March 2023*. DOI: 10.2523/IPTC-22797-MS.
- Delmastro Ch., Lavagno E., Schranz L., 2016. Energy and underground. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 55: 96–102. DOI: 10.1016/j.tust.2015.10.021.
- Hussain A., Al-Hadrami H., Emadi H., Altawati F., Thiyagarajan S., Marshall W., 2022. Experimental Investigation of Wellbore Integrity of Depleted Oil and Gas Reservoirs for Underground Hydrogen Storage. *Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, May 2022*. DOI: 10.4043/32003-MS.
- Hussain A., Emadibaladehi S., Leggett S., Thiyagarajan S., Watson M., 2023. Assessing the Viability of Oilwell Cement for Underground Hydrogen Storage. *57<sup>th</sup> U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, Atlanta, Georgia, USA, June 2023*. DOI: 10.56952/ARMA-2023-0746.

- Iorio V., Cracolici F., Parrozza F., Sabatino L., Massara E., Consonni A., Tritto C., De Simoni M., 2022. Cement to Safeguard the Wells Integrity in Underground Hydrogen Storage: an Experimental Investigation. *Chemical Engineering Transactions*, 96: 307–312. DOI: 10.3303/CET2296052.
- Iorio V., Cracolici F., Previde Massara E., Consonni A., Parrozza F., Lainati A., 2024. Technical Insights into the Compatibility of Salt-Saturated Cement for Underground Storage in Salt Caverns. *SPE Europe Energy Conference and Exhibition, Turin, Italy, June 2024*. DOI: 10.2118/220096-MS.
- Iordache I., Schitea D., Gheorghe A.V., Iordache M., 2014. Hydrogen underground storage in Romania, potential directions of development, stakeholders and general aspects. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39: 11071–11081. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.05.067.
- Kędzierski M., Rzepka M., 2022. Wstępne badania nad opracowaniem zaczynów cementowych przeznaczonych do podziemnego magazynowania wodoru w kawernach solnych. *Nafta-Gaz*, 2: 120–127. DOI: 10.18668/NG.2022.02.04.
- Kędzierski M., Rzepka M., 2023. Badania nad opracowaniem zaczynów cementowych do podziemnego magazynowania wodoru w kawernach solnych. *Nafta-Gaz*, 2: 96–105. DOI: 10.18668/NG.2023.02.03.
- Kędzierski M., Rzepka M., 2024. Doszczelnianie matrycy kamieni cementowych otrzymanych z zaczynów cementowych przeznaczonych do podziemnych magazynów wodoru w kawernach solnych. *Nafta-Gaz*, 1: 3–11. DOI: 10.18668/NG.2024.01.01.
- Kędzierski M., Rzepka M., 2025. Wpływ temperatury na właściwości stwardniałych zaczynów cementowych do podziemnego magazynowania wodoru w kawernach solnych. *Nafta-Gaz*, 4: 227–235. DOI: 10.18668/ng.2025.04.01.
- Lord A.S., Kobos P.H., Borna D.J., 2014. Geologic storage of hydrogen: Scaling up to meet city transportation demands. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(28): 15570–15582. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.07.121.
- Panfilov M., 2016. Underground and pipeline hydrogen storage. [W:] Gupta R.B., Basile A., Veziroğlu T.N. (red.). *Compendium of Hydrogen Energy*: 91–115. DOI: 10.1016/B978-1-78242-362-1.00004-3.
- Simon J., Ferriz A.M., Correas L.C., 2015. HyUnder – Hydrogen Underground Storage at Large Scale: Case Study Spain. *Energy Procedia*, 73: 136–144. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.661.
- Such P., 2020. Magazynowanie wodoru w obiektach geologicznych. *Nafta-Gaz*, 11: 794–798. DOI: 10.18668/NG.2020.11.04.
- Ugarte E., Tetteh D., Salehi S., 2023. Experimental studies of well integrity in cementing during underground hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 51, D, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.07.037.
- Zeng L., Sarmadivaleh M., Saeedi A., Al-Yaseri A., Fahd K., Dowling C., Buick G., Xie Q., 2022. Thermodynamic Modelling on Wellbore Cement Integrity During Underground Hydrogen Storage in Depleted Gas Reservoirs. *SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition, Adelaide, Australia, 17–19 October, 2022*. DOI: 10.2118/210639-MS.
- Zhang F., Zhao P., Niu M., Maddy J., 2016. The survey of key technologies in hydrogen energy storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(33): 14535–14552. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.05.293.

#### Akty normatywne

- PN-EN ISO 10426-1:2009 Przemysł naftowy i gazowniczy – Cementy i materiały do cementowania otworów – Część 1: Specyfikacja.
- PN-EN ISO 10426-2:2003 Przemysł naftowy i gazowniczy – Cementy i materiały do cementowania otworów wiertniczych – Część 2: Badania cementów wiertniczych.

---

**Nafta-Gaz 2026, vol. 82, no. 3, pp. 225–234, DOI: 10.18668/NG.2026.03.04**

## Research on positioning and velocity assessment technology for pipeline inspection gauges in long-distance pipelines based on acoustic-magnetic fusion

### Badania nad technologią wyznaczania położenia i oceny prędkości tłoków inspekcyjnych w rurociągach dalekosiężnych z wykorzystaniem fuzji akustyczno-magnetycznej

Feilong Zhou<sup>1</sup>, Yankun Jia<sup>1</sup>, Zhiwen Li<sup>1</sup>, Qin Xu<sup>1</sup>, Leilei Wang<sup>1</sup>, Zhongdi Liu<sup>1</sup>, Meng Xu<sup>1</sup>, Yutong Jiang<sup>2</sup>, Tengjiao He<sup>2</sup>, Kexi Liao<sup>2</sup>

<sup>1</sup> West-East Gas Pipeline Branch, China Oil Gas Pipeline Network Corporation (PipeChina)

<sup>2</sup> College of Petroleum and Natural Gas Engineering, Southwest Petroleum University

**ABSTRACT:** Aiming at the problems existing in the tracking and positioning technology during pigging and internal inspection operations of long-distance oil and gas pipelines, such as being limited by the large burial depth of pipelines and being susceptible to environmental interference, a ground tracking and positioning technology for pipeline inspection gauges based on acoustic-magnetic fusion is proposed. This technology uses non-contact high-precision magnetic sensors and acoustic-vibration sensors to synchronously collect external magnetic field and vibration signals of the pipeline. Through the spatiotemporal response of the magnetic field and vibration when the pipeline inspection gauge passes, as well as the signal time difference of dual magnetic sensors, it realizes the passage indication of pipeline inspection gauges and internal detectors and real-time monitoring of their operating speed. Field test results show that this technology can realize the tracking and positioning of pipeline inspection gauges under different environments, with a high signal-to-noise ratio. Meanwhile, there is a significant difference between the passage signal and the interference signal. The instantaneous speed can be calculated according to the time difference when the pipeline inspection gauge passes, which provides effective technical support for the safe operation and maintenance of pigging operations in long-distance pipelines.

**Key words:** long-distance pipelines, pipeline inspection gauges, internal detectors, acoustic-magnetic fusion, tracking and positioning, velocity assessment.

**STRESZCZENIE:** W artykule zaproponowano naziemną technologię śledzenia i pozycjonowania tłoków inspekcyjnych, opartą na fuzji akustyczno-magnetycznej. Rozwiązanie to stanowi odpowiedź na problemy występujące podczas tłokowania i inspekcji wewnętrznej dalekosiężnych rurociągów ropy naftowej i gazu, w szczególności ograniczenia wynikające ze znacznej głębokości posadowienia rurociągów oraz podatności stosowanych metod na zakłócenia środowiskowe. Technologia wykorzystuje bezkontaktowe, wysokoprecyzyjne czujniki magnetyczne oraz czujniki akustyczno-wibracyjne, które synchronicznie rejestrują sygnały zewnętrznego pola magnetycznego oraz drgania rurociągu. Analiza czasowo-przestrzennej odpowiedzi pola magnetycznego i drgań towarzyszących przejściu tłoka inspekcyjnego, a także różnicy czasowej sygnałów rejestrowanych przez dwa czujniki magnetyczne, umożliwiła detekcję przejścia tłoków inspekcyjnych i detektorów wewnętrznych oraz bieżące monitorowanie ich prędkości przemieszczania się. Wyniki badań terenowych wskazują, że omawiana technologia pozwala na śledzenie i pozycjonowanie tłoków inspekcyjnych w zróżnicowanych warunkach środowiskowych, zapewniając wysoki stosunek sygnału do szumu. Jednocześnie sygnał przejścia wyraźnie różni się od sygnałów zakłócających. Prędkość chwilową można wyznaczyć na podstawie różnicy czasu rejestracji sygnału podczas przejścia tłoka inspekcyjnego. Rozwiązanie to zapewnia skuteczne wsparcie techniczne dla bezpiecznego prowadzenia i utrzymania operacji tłokowania w rurociągach dalekosiężnych.

**Słowa kluczowe:** rurociągi dalekosiężne; tłoki inspekcyjne; detektory wewnętrzne; fuzja akustyczno-magnetyczna; śledzenie i pozycjonowanie; ocena prędkości.

## References

- Bernasconi G., Giunta G., 2020. Acoustic detection and tracking of a pipeline inspection gauge. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 194: 107549. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.107549.
- Du S., Zhang H., Gong C., Yang Y., Jiang X., Zhou L., Zhang T., Ma Y., Meng J., Li Y., 2024. A Pipeline Inspection Gauge Positioning Method Based on Distributed Fiber Optic Vibration Sensing. *IEEE Sensors Journal*, 24: 40855–40865. DOI: 10.1109/JSEN.2024.3475030.
- Guan L., Cong X., Zhang Q., Liu F., Gao Y., An W., Noureldin A., 2020. A Comprehensive Review of Micro-Inertial Measurement Unit Based Intelligent PIG Multi-Sensor Fusion Technologies for Small-Diameter Pipeline Surveying. *Micromachines*, 11: 840. DOI: 10.3390/mi11090840.
- Guan L., Gao Y., Liu H., An W., Noureldin A., 2019. A Review on Small-Diameter Pipeline Inspection Gauge Localization Techniques: Problems, Methods and Challenges. 2019 *International Conference on Communications, Signal Processing, and Their Applications (ICCSPA)*, 1–6. DOI: 10.1109/ICCSPA.2019.8713703.
- Huang C., Peng F., Liu K., 2021. Pipeline Inspection Gauge Positioning System Based on Optical Fiber Distributed Acoustic Sensing. *IEEE Sensors Journal*, 21: 25716–25722. DOI: 10.1109/JSEN.2021.3116973.
- Kim D.K., Cho S.H., Park S.S., Rho Y.W., Yoo H.R., Nguyen T.T., Kim S.B., 2003. Verification of the Theoretical Model for Analyzing Dynamic Behavior of the PIG from Actual Piggings. *KSME International Journal*, 17: 1349–1357. DOI: 10.1007/BF02982476.
- Liu H., Zhang H., Zhang X., Chen M., Gao M., 2024. Theoretical research of impact vibration of multi-section serial pipeline inspection gauge in large drop pipeline. *Engineering Failure Analysis*, 162: 108430. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2024.108430.
- Long Y., Huang S., Peng L., Wang W., Wang S., Zhao W., 2021. High-Precision and Four-Dimensional Tracking System with Dual Receivers of Pipeline Inspection Gauge. *Applied Sciences*, 11: 3366. DOI: 10.3390/app11083366.
- Olugboji O.A., Sadiq A.A., Olorunsaiye O., Peters D.O., Ajayi B.A., 2015. Development of a Smart Pipe Inspection Gauge for Detection of Pipeline Defects. *Volume 4B: Dynamics, Vibration, and Control*, 2015. DOI: 10.1115/IMECE2015-53064.
- Piao G., Guo J., Hu T., Deng Y., 2019. High-Sensitivity Real-Time Tracking System for High-Speed Pipeline Inspection Gauge. *Sensors*, 19(3): 731. DOI: 10.3390/s19030731.
- Rao P., Yelgaonkar V.N., Tiwari C.B., Dhakar V., Panicker M.C., 2023. Locating block caused by stuck PIGs in multi product pipeline using combination of radioisotope techniques. *Applied Radiation and Isotopes*, 193: 110660. DOI: 10.1016/j.apradiso.2023.110660.
- Verma A., Kaiwart A., Dubey N.D., Naseer F., Pradhan S., 2022. A review on various types of in-pipe inspection robot. *Materials Today: Proceedings*, 50: 1425–1434. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.08.335.
- Vinogradova I.L., Vinogradov S.L., Yantilina L.Z., Lyubopytov V.S., Sultanov A.K., 2015. Spherical gauge for in-pipe inspection based on the optical fiber grid, in: Andreev, V.A., Burdin, V.A., Sultanov, A.H., Morozov, O.G. (Eds.), *14<sup>th</sup> International Conference on Optical Technologies for Telecommunications*, 95330H. DOI: 10.1117/12.2180992.
- Zhang H., Zhang S., Liu S., Wang Y., Lin L., 2015a. Measurement and analysis of friction and dynamic characteristics of PIG's sealing disc passing through girth weld in oil and gas pipeline. *Measurement*, 64: 112–122. DOI: 10.1016/j.measurement.2014.12.046.
- Zhang H., Zhang S., Liu S., Zhu X., Tang B., 2015b. Chatter vibration phenomenon of pipeline inspection gauges (PIGs) in natural gas pipeline. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 27: 1129–1140. DOI: 10.1016/j.jngse.2015.09.054.

---

**Nafta-Gaz 2026, vol. 82, no. 3, pp. 235–243, DOI: 10.18668/NG.2026.03.05**

## Reliability analysis of mechanical drives of sucker-rod pumps accounting for unrecoverable failures

Analiza niezawodności napędów mechanicznych pomp żerdziowych z uwzględnieniem uszkodzeń nienaprawialnych

Iftikhar G. Chalabi, Shahin B. Charkasov

*Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan*

**ABSTRACT:** This study examines the impact of unrecoverable failures on the reliability of sucker-rod pump drives. As a critical component of sucker-rod pumps, the mechanical drive significantly influences the reliable operation of the entire system. While many failures can be addressed through repair, unrecoverable failures may occur due to damage, wear, or aging of system components. In this work, drive failures are modelled through three processes: recoverable failures characterized by failure and recovery rates, unrecoverable failures requiring system decommissioning, and aging, in which continued operation becomes economically unfeasible. A Markov model is employed to evaluate reliability under the assumption of exponentially distributed failures and recoveries. The analysis begins with a single drive component—the motor—and extends to multi-component drive systems. Analytical solutions via the Laplace transform are complex; therefore, Kolmogorov's system of differential equations was solved numerically using MATLAB. The results demonstrate that unrecoverable failures significantly affect system reliability, highlighting the necessity of accounting for such failures when assessing reliability indices and planning replacements for the drive or its individual components.

**Key words:** sucker-rod pumps, drive systems, unrecoverable failures, reliability indicators, failure rate, Markov model.

**STRESZCZENIE:** W niniejszej pracy przeanalizowano wpływ uszkodzeń nienaprawialnych na niezawodność układów napędowych pomp żerdziowych. Napęd mechaniczny, jako jeden z kluczowych elementów pompy żerdziowej, ma istotny wpływ na niezawodność pracy całego układu. O ile wiele uszkodzeń można usunąć w drodze naprawy, o tyle uszkodzenia nienaprawialne mogą wynikać z awarii, zużycia lub starzenia się elementów systemu. W artykule uszkodzenia napędu opisano za pomocą trzech procesów: uszkodzeń naprawialnych, charakteryzowanych intensywnością uszkodzeń i intensywnością odnowy, uszkodzeń nienaprawialnych wymagających wycofania systemu z eksploatacji oraz procesu starzenia, w którym dalsze użytkowanie staje się ekonomicznie nieuzasadnione. Do oceny niezawodności zastosowano model Markowa, przyjmując wykładniczy rozkład czasów do wystąpienia uszkodzeń oraz czasów odnowy. Analizę rozpoczęto od pojedynczego elementu napędu, tj. silnika, a następnie rozszerzono ją na wieloelementowe układy napędowe. Ponieważ rozwiązania analityczne z wykorzystaniem transformaty Laplace'a są złożone, układ równań różniczkowych Kołmogorowa rozwiązano numerycznie w środowisku MATLAB. Uzyskane wyniki wskazują, że uszkodzenia nienaprawialne istotnie wpływają na niezawodność systemu, co potwierdza konieczność ich uwzględniania zarówno przy wyznaczaniu wskaźników niezawodności, jak i przy planowaniu wymiany napędu lub jego poszczególnych elementów.

**Słowa kluczowe:** pompy żerdziowe; układy napędowe; uszkodzenia nienaprawialne; wskaźniki niezawodności; intensywność uszkodzeń; model Markowa.

## References

- Abdullayev A.I., Chalabi I.G., 2020. Estimation of the Reliability of the Gear-Motor System Using a Markov Model. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. Vol. 49, 2: 129–136. DOI: 10.3103/S1052618820020028.
- Babayev S.Q., Habibov I.A., Melikov R.Kh., 2015. Osнови teorii nadejnosti neftepromislovoqo oborudovaniya. *AQNA, Baku*, 400.
- Bertsche B., 2008. Reliability in Automotive and Mechanical Engineering: Determination of Component and System Reliability. *Springer, Berlin, Heidelberg*, 487. DOI: 10.1007/978-3-540-34282-3.
- Birolini B., 2017. Reliability Engineering: Theory and Practice. *Springer, Berlin, Heidelberg*, 651.
- Bronstein I.N., Semendiyayev K.A., Musiol G., Mühlhig H., 2015. Handbook of Mathematics. 6<sup>th</sup> ed. *Springer*, 1022.
- Chalabi I., Ahmedov B., Charkasov Sh., Yusubov Sh., 2022. Comparative service life analysis for Novikov gears of mechanical drives of sucker-rod pumps. *Journal SOCAR Proceedings. Special Issue*, 2: 53–59. DOI: 10.5510/OGP2022SI200776.
- Chalabi I., 2021. An Alternative Failure Distribution for Reliability Evaluation of Diverse Technological Systems. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 21: 1866–1874. DOI: 10.1007/s11668-021-01244-1.
- Chalabi I., Ahmedov B., Hajiyev A., 2021. Comparative analysis of gears service life of mechanical drive for sucker-rod pumps. *Oil Gas European Magazine*. 47. Edition, Issue 1: 40–45. DOI: 10.19225/210308.
- Härtler G., 2016. Statistik für Ausfalldaten: Modelle und Methoden für Zuverlässigkeitsuntersuchungen. *Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg*, 212.
- Moubray J., 1997. Reliability-centered maintenance. *Industrial Press, New York*, 423.
- Storm R., 2001. Wahrscheinlichkeitrechnung, mathematische Statistik und statistische Qualitätskontrolle. *Fachbuchverlag, Leipzig*, 424.
- Strunz M., 2012. Instandhaltung: Grundlagen – Strategien – Werkstätten. *Springer Vieweg, Berlin Heidelberg*, 658.
- Takacs G., 2015. Sucker-Rod Pumping Handbook. *Elsevier Science, Waltham, MA, USA*, 598.
- Tschalabi I., 2019. Zuverlässigkeitsanalyse für reparierbare Systeme unter Berücksichtigung der nicht behebbaren Ausfälle. *VDI Berichte*, 2345: 73–84. DOI: 10.51202/9783181023457-73.
- Tschalabi I., 2020. Zuverlässigkeitsanalyse für technische Systeme unter Berücksichtigung der behebbaren und nicht behebbaren Ausfälle. *Forschung im Ingenieurwesen*. Volume 84, 1: 47–54. DOI: 10.1007/s10010-019-00388-9.
- Ushakov I.A., Harrison R.A., 1994. Handbook of reliability engineering. *John Wiley & Sons, Hoboken*, 704.

## Legal and Normative Acts

- Deutsches Institut für Normung DIN 40041, 1990. Zuverlässigkeit: Begriffe. Beuth, Berlin, 19.
- Deutsches Institut für Normung DIN 31051., 2012. Grundlagen der Instandhaltung. Beuth, Berlin, 13.

# Long-term studies of hardened cement slurries under conditions simulating the operation of underground hydrogen storage facilities

Marcin Rzepka, Miłosz Kędzierski

*Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy*

**STRESZCZENIE:** W artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych stwardniałych zaczynów cementowych przeznaczonych do użycia w podziemnych magazynach wodoru. Testy laboratoryjne prowadzone były dla trzynastu receptur zaczynów cementowych (dziesięć receptur wykonano na 3-proc. roztworze KCl, natomiast trzy receptury na solance NaCl o pełnym nasyceniu). Do zaczynów wprowadzano różne dodatki modyfikujące (m.in. nanomateriały w postaci nano-SiO<sub>2</sub>, nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, lateks oraz środek polimerowy). Ponadto w skład zaczynów cementowych wchodziły domieszki odpieniające, upłynniające, antyfiltracyjne, spęczniające oraz opóźniacz czasu wiązania. Badania prowadzono w autoklawach ciśnieniowych, jak i przy ciśnieniu atmosferycznym. Do sporządzania zaczynów cementowych używano mikro-cementu, gipsu modelowego i cementu wiertniczego klasy G. Określano parametry technologiczne stwardniałych zaczynów cementowych, tj. wytrzymałość na ściskanie, przyczepność do rur stalowych oraz porowatość. Spośród testowanych receptur zarabianych 3-proc. roztworem KCl najkorzystniejsze parametry technologiczne uzyskano dla próbki zawierającej w swym składzie 0,5% nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (nanoglinu) oraz 20% mikro-cementu. Kamień cementowy powstały po związaniu tego zaczynu cechował się niezwykle wysoką wytrzymałością mechaniczną. Po 20 miesiącach hydratacji próbki osiągnęły wytrzymałość ok. 53–55 MPa. Przyczepność do rur stalowych próbek cementowych również była bardzo wysoka i wynosiła ok. 12 MPa. Kamień cementowy z nanoglinem i mikro-cementem posiadał również najniższą porowatość spośród badanych próbek (jego porowatość po deponowaniu w autoklawie wyniosła 19%). Pory o najmniejszych rozmiarach (poniżej 100 nm) stanowiły zdecydowaną większość z ogólnej ilości porów występujących w matrycy cementowej (było to ponad 95% ogólnej ilości porów). W przypadku próbek sporządzanych na bazie solanki NaCl o pełnym nasyceniu zauważano nieznaczną poprawę parametrów technologicznych zaczynów wzbogaconych nanokomponentami w porównaniu z zaczynem bazowym. Uogólniając, parametry mechaniczne zaczynów cementowych zarabianych wodą, w której rozpuszczono 360 g/l soli NaCl, były słabsze niż te, jakie uzyskano dla próbek wykonanych na 3-proc. roztworze KCl. Zaprezentowane w artykule receptury zaczynów cementowych o najlepszych parametrach, zawierające odpowiednio dobrane komponenty, mogą być rekomendowane do prac związanych z uszczelnianiem rur okładzinowych w otworach wierconych dla magazynowania wodoru.

**Słowa kluczowe:** zaczyn cementowy, kamień cementowy, magazynowanie wodoru.

**ABSTRACT:** The article presents the results of laboratory tests on hardened cement slurries intended for use in underground hydrogen storage facilities. Laboratory tests were conducted for thirteen cement slurry formulations (ten prepared using a 3% KCl solution, and three using a fully saturated NaCl brine). Various modifying additives were introduced into the slurries (including nanomaterials in the form of nano-SiO<sub>2</sub>, nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, latex, and a polymer agent). Furthermore, the cement slurries contained defoaming, fluidizing, anti-filtration, and expansive admixtures, as well as a set retarder. The tests were carried out both in pressure autoclaves and at atmospheric pressure. Microcement, modeling gypsum, and API Class G well cement were used to prepare the cement slurries. The technological parameters of the hardened cement slurries, i.e., compressive strength, adhesion to steel pipes, and porosity, were determined. Among the tested formulations prepared using a 3% KCl solution, the most favorable technological parameters were obtained for the sample containing 0.5% nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (nanoalumina) and 20% microcement. The cement stone formed after the setting of this slurry was characterized by exceptionally high mechanical strength. After 20 months of hydration, the samples reached a strength of approximately 53–55 MPa. The adhesion of the cement samples to steel pipes was also very high, amounting to approximately 12 MPa. The formulation containing nanoalumina and microcement also had the lowest porosity among the tested samples (its porosity after deposition in the autoclave was 19%). The smallest pores, with diameters below 100 nm, constituted the vast majority of the total number of pores present in the cement matrix, accounting for over 95% of the total number of pores. For samples prepared with fully saturated NaCl brine, a slight improvement in the technological parameters of the cement slurries enriched with nanocomponents was observed compared with the base slurry. In general, the mechanical parameters of cement slurries mixed with water in which 360 g/L of NaCl salt had been dissolved were lower than those obtained for samples prepared using a 3% KCl solution. The cement slurry formulations presented in the article, exhibiting the most favorable parameters and containing appropriately selected components, can be recommended for use in sealing casing pipes in boreholes designed for hydrogen storage.

**Key words:** cement slurry, cement stone, hydrogen storage.

## Literatura

- Aftab A., Hassanpouryouzband A., Martin A., Kendrick J.E., Thaysen E.M., Heinemann N., Utley J., Wilkinson M., Haszeldine R.S., Edlmann K., 2023. Geochemical integrity of wellbore cements during geological hydrogen storage. *Environ. Sci. Technol. Lett.*, 10(7): 551–556.
- Al-Yaseri A., Fatah A., Zeng L., Al-Ramadhan A., Sarmadivaleh M., Xie Q., 2023. On hydrogen-cement reaction: investigation on well integrity during underground hydrogen storage. *Int. J. Hydrog. Energy*, 48(91): 35610–35623.
- Bayanak M., Zarinabadi S., Shahbazi K., Azimi A., 2020. Reduction of fluid migration in well cement slurry using nanoparticles. *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP Energies nouvelles*, 75: 67. DOI: 10.2516/ogst/2020044.
- Biricik H., Sarier N., 2014. Comparative Study Of The Characteristics Of Nano Silica-, Silica Fume- And Fly Ash-Incorporated Cement Mortars. *Mat. Res.*, 17(3). DOI: 10.1590/S1516-14392014005000054.
- Gaitero J.J., Campillo I., Guerrero A., 2008. Reduction of the calcium leaching rate of cement paste by addition of silica nanoparticles. *Cem. Concr. Res.*, 38(8–9): 1112–1118.
- Hadi H.A., Ameer H.A., 2017. Experimental Investigation of Nano Alumina and Nano Silica on Strength and Consistency of Oil Well Cement. *Journal of Engineering*, 23(12): 51–69.
- Kędzierski M., Rzepka M., 2022. Wstępne badania nad opracowaniem zaczynów cementowych przeznaczonych do podziemnego magazynowania wodoru w kawernach solnych. *Nafta-Gaz*, 2: 120–127. DOI: 10.18668/NG.2022.02.04.
- Kędzierski M., Rzepka M., 2023. Badania nad opracowaniem zaczynów cementowych do podziemnego magazynowania wodoru w kawernach solnych. *Nafta-Gaz*, 2: 96–105. DOI: 10.18668/NG.2023.02.03.
- Kędzierski M., Rzepka M., 2024. Doszczelnienie matrycy kamieni cementowych otrzymanych z zaczynów cementowych przeznaczonych do podziemnych magazynów wodoru w kawernach solnych. *Nafta-Gaz*, 1: 3–11. DOI: 10.18668/NG.2024.01.01.

- Labus K., Leśniak G., Cicha-Szot R., 2022. Geochemiczne modelowanie wpływu magazynowania wodoru na porowate skały zbiornikowe. *Materiały z Konferencji Geopetrol Zakopane 2022*: 201–208.
- Miziołek M., Filar B., Kwilosz T., 2022. Magazynowanie wodoru w szcerpanych złożach gazu ziemnego. *Nafta-Gaz*, 3: 219–239. DOI: 10.18668/NG.2022.03.06.
- Patil R., Deshpande A., 2012. Use of Nanomaterials in Cementing Applications. *SPE 155607*. DOI: 10.2118/155607-MS.
- Rocha J.S., Calado V., Tavares F., 2013. Study of the Influence of Cement Slurry Composition in the Gas Migration. OTC 24420, *Technology Conference Brasil held in Rio de Janeiro*, 29–31 October 2013. DOI: 10.4043/24420-MS.
- Rzepka M., Kędziński M., 2019. Zaczyny cementowe z dodatkiem nanokomponentów do uszczelniania kolumn rur okładzinowych w otworach wiertniczych o głębokości końcowej około 1000–2000 metrów. *Nafta-Gaz*, 11: 674–682. DOI: 10.18668/NG.2019.11.02.
- Rzepka M., Kędziński M., 2020. Możliwości zastosowania nanotlenku glinu w zaczynach cementowych przeznaczonych do uszczelniania rur okładzinowych w otworach wiertniczych, *Nafta-Gaz*, 1: 46–56, DOI: 10.18668/NG.2020.01.06.
- Rzepka M., Kędziński M., 2023. Badania zaczynów cementowych przeznaczonych do uszczelniania kolumn rur okładzinowych w podziemnych magazynach wodoru w szcerpanych złożach węglowodorów. *Nafta-Gaz*, 4: 244–251. DOI: 10.18668/NG.2023.04.02.
- Rzepka M., Kędziński M., 2025. Badania kamieni cementowych powstałych z zaczynów przeznaczonych do uszczelniania podziemnych magazynach wodoru w szcerpanych złożach węglowodorów. *Nafta-Gaz*, 5: 325–333. DOI: 10.18668/NG.2025.05.03.
- Such P., 2020. Magazynowanie wodoru w obiektach geologicznych. *Nafta-Gaz*, 11: 794–798. DOI: 10.18668/NG.2020.11.04.
- Velayati A., Kazemzadeh E., Soltanian H., Tokhmechi B., 2015. Gas migration through cement slurries analysis: A comparative laboratory study. *Int. J. Min. & Geo-Eng.*, 49(2): 281–288. DOI: 10.22059/ijmge.2015.56113.
- Zeng L., Sarmadivaleh M., Saeedi A., Chen Y., Zhong Z., Xie Q., 2023. Storage integrity during underground hydrogen storage in depleted gas reservoirs. *Earth-Science Reviews*, 247: 10462.

#### Akty prawne, dokumenty normatywne i patenty

- PN-EN ISO 10426-1:2009 Przemysł naftowy i gazowniczy – Cementy i materiały do cementowania otworów wiertniczych – Część 1: Specyfikacja.
- PN-EN ISO 10426-2:2003 Przemysł naftowy i gazowniczy – Cementy i materiały do cementowania otworów wiertniczych – Część 2: Badania cementów wiertniczych.

---

**Nafta-Gaz 2026, tom 82, nr 3, s. 253–269, DOI: 10.18668/NG.2026.03.07**

## Protonowo przewodzące szkła fosforanowo-krzemianowe jako potencjalne elektrolity do średniotemperaturowych ogniw paliwowych o mniejszych wymaganiach czystości wodoru

### Proton-conducting phosphate-silicate glasses as potential electrolytes for medium-temperature fuel cells with lowered hydrogen purity requirements

Maja Mroczkowska-Szerszeń<sup>1</sup>, Karolina Majewska<sup>2</sup>, Jacek Kowalczyk<sup>3</sup>, Rafał Letmanowski<sup>3</sup>, Magdalena Dudek<sup>4</sup>, Maciej Siekierski<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

<sup>2</sup> Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa, Politechnika Warszawska

<sup>3</sup> Wydział Chemiczny, Politechnika Warszawska

<sup>4</sup> Wydział Energetyki i Paliw, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

**STRESZCZENIE:** Ogniwa paliwowe to jeden z głównych elementów zrównoważonych i rozproszonych systemów produkcji i magazynowania energii odnawialnej wykorzystujących wodór. Stanowią one także krytyczny element kolejnej fazy rewolucji transportowej, która polegać ma na zastąpieniu samochodów zasilanych ogniwami litowo-jonowymi przez ich „wodorowych” następców. Sprawność energetyczna w układach ogniw paliwowych teoretycznie sięga nawet 83%, jednak ze względu na niedoskonałość materiałów elektrokatalitycznych w praktyce rzadko przekracza 40%. Kolejnym poważnym ograniczeniem pracujących w temperaturze 70–80°C ogniw PEM są ekstremalne wymogi czystości wodoru. Ponadto temperatura pracy tego typu układów zapewnia ciepło resztkowe o znikomej dla zastosowań przemysłowych wartości. Z kolei konstrukcje wysokotemperaturowe (SOFC, PCCFC, MCFC) wykorzystują odmienne katalizatory, które są odporne na zatrucie, jak również produkują ciepło resztkowe o parametrach umożliwiających jego szersze zastosowanie. Niestety charakteryzują się bardzo długimi czasami rozruchu, między innymi z powodu konieczności osiągnięcia optymalnych temperatur eksploatacji. Stąd też rodzi się potrzeba opracowania konstrukcji pracujących w pośrednim zakresie temperatur, które dla wielu potencjalnych zastosowań mogą stanowić rozsądny kompromis pomiędzy dostępnymi obecnie rozwiązaniami komercyjnymi. W prezentowanym artykule omówiono zalety hipotetycznych rozwiązań średniotemperaturowych, jak również problemy, które mogą wystąpić przy ich projektowaniu. Przedstawiono również wyniki prac badawczych nad jednym z krytycznych komponentów tej konstrukcji – protonowo przewodzącym elektrolitem. W pracy opisano koncepcję opracowywanego elektrolitu opartego na interpenetrujących sieciach polikwasów nieorganicznych. Materiał taki powinien być zdolny do pracy w warunkach nawilżenia nienasyconą parą wodną, przy ograniczeniu temperaturą roboczą układu. W artykule zaprezentowano wybrane wyniki własnych prac badawczych dla układów szklanych, kompozytów fosfokrzemianowych oraz fosfokrzemianowych z dodatkami polimerowymi i ceramicznymi. Domieszkowanie matrycy szklanej mające na celu między innymi poprawę właściwości mechanicznych wymagało jednak każdorazowej weryfikacji parametrów elektrycznych, jako że niemal każda zmiana w składzie chemicznym wpływa na własności elektrochemiczne układu. W pracy przedstawiono wybrane charakterystyki materiałowe, obejmujące analizy

strukturalne FTIR, XRD i ciepne (DTA), a także wyniki zmiennoprądowych pomiarów elektrycznych EIS oraz charakterystyki prądowo-mocowe.

Słowa kluczowe: ogniwa paliwowe średnotemperaturowe, elektrolity stałe, nieorganiczne membrany amorficzne, H<sub>2</sub>, PEMFC.

**ABSTRACT:** Fuel cells are one of the key components of sustainable and distributed renewable energy production and storage systems using hydrogen. They are also a critical component of the next phase of the transportation revolution that is expected to replace lithium-ion cell-powered cars with their 'hydrogen' successors. Energy efficiency of the cell up to 83% is theoretically achievable, but due to the sluggish kinetics resulting from drawbacks of the electrocatalytic materials, in practice it rarely exceeds 40%. Other serious limitations include the extreme purity requirements of the hydrogen supplying the PEM cells operating at 70–80°C and the very long start-up times of their high-temperature counterparts (SOFCs, PCCFCs, MCFCs), free from formerly mentioned drawback. Due to the both different composition of the respective catalytic materials and the differences in the operational conditions they are not only significantly less prone to the catalyst poisoning, but also deliver much more effective and efficient modes of the waste heat management. Hence the need arises to develop designs operating in the intermediate temperature range, which for many potential applications can represent a reasonable compromise between currently available commercial solutions. The material presented here describes the advantages of such hypothetical intermediate-temperature solutions and presents the results of research work on one of their critical components, which is a glassy proton-conducting electrolyte, utilizing interpenetrating networks of inorganic polyacids, capable of operating at the system's operational temperature-limited relative humidities of the working gases and thus, with the electrode-electrolytes system deprived of full hydration. The research results presented in the article concern glassy phospho-silicate and phospho-silicate composite systems with polymer and ceramic additives modifying their mechanical and electrical properties. Material characteristics like FTIR, XRD, DTA results as well as electrical EIS, a current-power characteristics are presented.

Key words: medium temperature fuel cells, solid electrolytes, inorganic amorphous membranes, H<sub>2</sub>, PEMFC.

## Literatura

- Adjemian K.T., Lee S.J., Srinivasan S., Benziger J., Bocarsly A.B., 2002. Silicon Oxide Nafion Composite Membranes for Proton-Exchange Membrane Fuel Cell Operation at 80–140°C. *Journal of The Electrochemical Society*, 149(3): A256. DOI: 10.1149/1.1445431.
- Allis-Chalmers Company, 1959. Allis-Chalmers Fuel Cell Tractor.
- Ao Y., Laghrouche S., Depernet D., Chen K., 2020. Lifetime prediction for proton exchange membrane fuel cell under real driving cycles based on platinum particle dissolve model. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(56): 32388–32401. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.08.188.
- Baldi F., Wang L., Pérez-Fortes M., Maréchal F., 2019. A Cogeneration System Based on Solid Oxide and Proton Exchange Membrane Fuel Cells With Hybrid Storage for Off-Grid Applications. *Frontiers in Energy Research*, 6: 139. DOI: 10.3389/fenrg.2018.00139.
- Bergmann A., Gerteisen D., Kurz T., 2010. Modelling of CO Poisoning and its Dynamics in HTPEM Fuel Cells. *Fuel Cells*, 10(2): 278–287. DOI: 10.1002/fuce.200900128.
- Cao L., Sun Q., Gao Y., Liu L., Shi H., 2015. Novel acid-base hybrid membrane based on amine-functionalized reduced graphene oxide and sulfonated polyimide for vanadium redox flow battery. *Electrochimica Acta*, 158: 24–34. DOI: 10.1016/j.electacta.2015.01.159.
- Cha M.S., Lee J.Y., Kim T.H., Jeong H.Y., Shin H.Y., Oh S.G., Hong Y.T., 2017. Preparation and characterization of crosslinked anion exchange membrane (AEM) materials with poly(phenylene ether)-based short hydrophilic block for use in electrochemical applications. *Journal of Membrane Science*, 530: 73–83. DOI: 10.1016/j.memsci.2017.02.015.
- Chin D.T., Howard P.D., 1986. Hydrogen Sulfide Poisoning of Platinum Anode in Phosphoric Acid Fuel Cell Electrolyte. *Journal of The Electrochemical Society*, 133(12): 2447–2450. DOI: 10.1149/1.2108447.
- Devrim Y., Erkan S., Baç N., Eroğlu I., 2009. Preparation and characterization of sulfonated polysulfone/titanium dioxide composite membranes for proton exchange membrane fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(8): 3467–3475. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2009.02.019.
- Du F., Dao T.A., Peitl P.V.J., Bauer A., Preuss K., Bonastre A.M., Sharman J., Spikes G., Perchthaler M., Schmidt T.J., Orfanidi A., 2020. Effects of PEMFC Operational History under Dry/Wet Conditions on Additional Voltage Losses due to Ionomer Migration. *Journal of The Electrochemical Society*, 167(14): 144513. DOI: 10.1149/1945-7111/abc83f.
- Dwivedi S., 2020. Solid oxide fuel cell: Materials for anode, cathode and electrolyte. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(44): 23988–24013. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.11.234.
- Eguizábal A., Lemus J., Urbiztondo M., Garrido O., Soler J., Blazquez J.A., Pina M.P., 2011. Novel hybrid membranes based on polybenzimidazole and ETS-10 titanosilicate type material for high temperature proton exchange membrane fuel cells: A comprehensive study on dense and porous systems. *Journal of Power Sources*, 196(21): 8994–9007. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2011.03.006.
- Gang X., Qingfeng L., Hjuler H.A., Bjerrum N.J., 1995. Hydrogen Oxidation on Gas Diffusion Electrodes for Phosphoric Acid Fuel Cells in the Presence of Carbon Monoxide and Oxygen. *Journal of The Electrochemical Society*, 142(9): 2890–2893. DOI: 10.1149/1.2048660.
- Grimes P., b.d. Historical pathways for fuel cells. The new electric century. *Fifteenth Annual Battery Conference on Applications and Advances*. DOI: 10.1109/BCAA.2000.838369.
- Haider R., Wen Y., Ma Z.-F., Wilkinson D.P., Zhang L., Yuan X., Song S., Zhang J., 2021. High temperature proton exchange membrane fuel cells: progress in advanced materials and key technologies. *Chemical Society Reviews*, 50(2): 1138–1187. DOI: 10.1039/D0CS00296H.
- Haseli Y., 2018. Maximum conversion efficiency of hydrogen fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(18), 9015–9021. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.03.076.
- He Y., Wang J., Zhang H., Zhang T., Zhang B., Cao S., Liu J. 2014. Polydopamine-modified graphene oxide nanocomposite membrane for proton exchange membrane fuel cell under anhydrous conditions. *Journal of Materials Chemistry A*, 2(25): 9548–9558. DOI: 10.1039/c3ta15301k.
- Horizon Educational. Open-cathode PEM fuel cells. <<https://www.horizoneducational.com>> (dostęp: 23.06.2025).
- Huang P.-H., Kuo J.-K., Huang C.-Y., 2016. A new application of the UltraBattery to hybrid fuel cell vehicles. *International Journal of Energy Research*, 40(2): 146–159. DOI: 10.1002/er.3426.
- Hwang J.J., Chang W.R., 2012. Characteristic study on fuel cell/battery hybrid power system on a light electric vehicle. *Journal of Power Sources*, 207: 111–119. DOI: 10.1016/J.JPOWSOUR.2012.02.008.
- Hwang K., Kim J.H., Kim S.Y., Byun H., 2014. Preparation of polybenzimidazole-based membranes and their potential applications in the fuel cell system. *Energies*, 7(3), 1721–1732. DOI: 10.3390/en7031721.

- Izurieta E.M., Cañete B., Pedernera M.N., López E., 2022. Biofuels-based hybrid MCFC/gas turbine plant design and simulation for power and heat generation. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 39(3): 759–771. DOI: 10.1007/s43153-021-00194-3.
- Jia J.B., Cham Y.T., Wang Y., Lewis F., 2007. The Electrical Dynamic Response Study of PEMFC as a Backup Power Supply. *2007 IEEE International Conference on Control and Automation, Guangzhou, China*, 1156–1161. DOI: 10.1109/ICCA.2007.4376542.
- Jonscher A.K., 1999. Dielectric relaxation in solids. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 32(14): R57–R70. DOI: 10.1088/0022-3727/32/14/201.
- Kim D.J., Choi D.H., Park C.H., Nam S.Y., 2016. Characterization of the sulfonated PEEK/sulfonated nanoparticles composite membrane for the fuel cell application. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(13): 5793–5802. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.02.056.
- Kim H.R., Lee J.H., Kim T.S., 2020. Optimal thermo-economic design of a PAFC-ORC combined power system. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 34(9): 3863–3874. DOI: 10.1007/s12206-020-0837-5.
- Kim S., Hong I., 2008. Effects of humidity and temperature on a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) stack. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 14(3): 357–364. DOI: 10.1016/j.jiec.2008.01.007.
- Kohlstruck B., 2001. Applications with proton exchange membrane (PEM) fuel cells for a deregulated market place. *16<sup>th</sup> International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2001)*, IEE v4-12-v4-12. DOI: 10.1049/cp:20010838.
- Koubaa R., Bacha S., Smaoui M., Krichen L., 2020. Robust optimization based energy management of a fuel cell/ultra-capacitor hybrid electric vehicle under uncertainty. *Energy*, 200: 117530. DOI: 10.1016/J.ENERGY.2020.117530.
- Krishnan N.N., Lee S., Ghorpade R.V., Konovalova A., Jang J.H., Kim H.J., Han J., Henkensmeier D., Han H., 2018. Polybenzimidazole (PBI-OO) based composite membranes using sulfophenylated TiO<sub>2</sub> as both filler and crosslinker, and their use in the HT-PEM fuel cell. *Journal of Membrane Science*, 560: 11–20. DOI: 10.1016/j.memsci.2018.05.006.
- Li Q., He R., Gao J.-A., Jensen J.O., Bjerrum N.J., 2003. The CO Poisoning Effect in PEMFCs Operational at Temperatures up to 200°C. *Journal of The Electrochemical Society*, 150(12): A1599. DOI: 10.1149/1.1619984.
- Liang J., Fan L., Miao T., Xie X., Wang Z., Chen X., Gong Z., Zhai H., Jiao K., 2022. Cold start mode classification based on the water state for proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Materials Chemistry A*, 10(38): 20254–20264. DOI: 10.1039/D2TA05175C.
- Lobato J., Cañizares P., Rodrigo M.A., Linares J.J., Úbeda D., Pinar F.J., 2010. Study of the Catalytic Layer in Polybenzimidazole--based High Temperature PEMFC: Effect of Platinum Content on the Carbon Support. *Fuel Cells*, 10(2): 312–319. DOI: 10.1002/fuce.200900088.
- Lufrano F., Squadrito G., Patti A., Passalacqua E., 2000. Sulfonated polysulfone as promising membranes for polymer electrolyte fuel cells. *Journal of Applied Polymer Science*, 77(6), 1250–1256. DOI: 10.1002/1097-4628(20000808)77:6<1250::AID-APP9>3.0.CO;2-R.
- Maass S., Finsterwalder F., Frank G., Hartmann R., Merten C., 2008. Carbon support oxidation in PEM fuel cell cathodes. *Journal of Power Sources*, 176(2): 444–451. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2007.08.053.
- Macias A., El Ghossein N., Trovão J., Sari A., Venet P., Boulon L., 2021. Passive fuel cell/lithium-ion capacitor hybridization for vehicular applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(56): 28748–28759. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.06.126.
- Makita K., Nogami M., Abe Y., 1998. Sol-Gel Synthesis of Proton-Conducting Amorphous Films Containing P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 106(1232): 396–401. DOI: 10.2109/jcersj.106.396.
- Mehta N., 2010. Meyer–Neldel rule in chalcogenide glasses: Recent observations and their consequences. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 14(5): 95–106. DOI: 10.1016/j.cossms.2010.06.001.
- Mossayebi Z., Saririchi T., Rowshanzamir S., Parnian M.J., 2016. Investigation and optimization of physicochemical properties of sulfated zirconia/sulfonated poly (ether ether ketone) nanocomposite membranes for medium temperature proton exchange membrane fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(28): 12293–12306. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.05.017.
- Nogami M., Nagao R., Wong C., Kasuga T., Hayakawa T., 1999. High Proton Conductivity in Porous P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>–SiO<sub>2</sub> Glasses. *The Journal of Physical Chemistry B*, 103(44): 9468–9472. DOI: 10.1021/jp991277s.
- Oh K., Ju H., 2015. Temperature dependence of CO poisoning in high-temperature proton exchange membrane fuel cells with phosphoric acid-doped polybenzimidazole membranes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(24): 7743–7753. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.01.107.
- Pahon E., Bouquain D., Hissel D., Rouet A., Vacquier C., 2021. Performance analysis of proton exchange membrane fuel cell in automotive applications. *Journal of Power Sources*, 7(510): 230385. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2021.230385.
- Ran J., Wu L., Ru Y., Hu M., Din L., Xu T., 2015. Anion exchange membranes (AEMs) based on poly(2,6-dimethyl-1,4-phenylene oxide) (PPO) and its derivatives. *Polymer Chemistry*, 6(32): 5809–5826. DOI: 10.1039/C4PY01671H.
- Rees R.W., 1966. US patent nr US3264272A (Ionic hydrocarbon polymers).
- Schonvogel D., Büsselmann J., Wagner P., Kraus H., Misz U., Langnickel H., Dyck A., 2021. Effect of air contamination by sulfur dioxide on the high temperature PEM fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(9): 6751–6761. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.11.136.
- Siekierski M., Mroczkowska-Szerszeń M., Letmanowski R., Dariusz Z., Piszcz M., Dudek L., Struzik M.M., Winkowska-Struzik M., Cicha-Szot R., Dudek M., 2020. Ionic Transport Properties of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>–SiO<sub>2</sub> Glassy Protonic Composites Doped with Polymer and Inorganic Titanium-based Fillers. *Materials*, 13(13): 3004.
- Takamuku S., Jannasch P., 2012. Multiblock copolymers with highly sulfonated blocks containing di- and tetrasulfonated arylene sulfone segments for proton exchange membrane fuel cell applications. *Advanced Energy Materials*, 2(1): 129–140. DOI: 10.1002/aenm.201100515.
- Uma T., Nogami M., 2006. Synthesis and characterization of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>–SiO<sub>2</sub>–X (X=phosphotungstic acid) glasses as electrolyte for low temperature H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> fuel cell application. *Journal of Membrane Science*, 280(1–2): 744–751. DOI: 10.1016/j.memsci.2006.02.033.
- Wang C., Nogami M., Abe Y., 1999. Protonic Conduction in P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>–SiO<sub>2</sub> Glasses Prepared by Sol-Gel Method. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 14(3): 273–279. DOI: 10.1023/A:1008769529419.
- Wang F., Kishimoto H., Ishiyama T., Develos-Bagarinao K., Yamaji K., Horita T., Yokokawa H., 2020. A review of sulfur poisoning of solid oxide fuel cell cathode materials for solid oxide fuel cells. *Journal of Power Sources*, 478: 228763. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2020.228763.
- Warshay M., Prokopius P.R., 1989. The Fuel Cell in Space: Yesterday, Today and Tomorrow. *Grove Anniversary (1839-1989) Fuel Cell Symposium, London*.
- Wu Y., Wu C., Varcoe J.R., Poynton S.D., Xu T., Fu Y., 2010. Novel silica/poly(2,6-dimethyl-1,4-phenylene oxide) hybrid anion-exchange membranes for alkaline fuel cells: Effect of silica content and the single cell performance. *Journal of Power Sources*, 195(10): 3069–3076. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2009.11.118.
- Xing P., Robertson G.P., Guiver M.D., Mikhailenko S.D., Wang K., Kaliaguine S., 2004. Synthesis and characterization of sulfonated poly(ether ether ketone) for proton exchange membranes. *Journal of Membrane Science*, 229(1–2), 95–106. DOI: 10.1016/j.memsci.2003.09.019.
- Yang Z., Du Q., Jia Z., Yang C., Jiao K., 2019. Effects of operating conditions on water and heat management by a transient multi-dimensional PEMFC system model. *Energy*, 183: 462–476. DOI: 10.1016/j.energy.2019.06.148.

Yu T.H., Sha Y., Liu W.-G., Merinov B.V., Shirvanian P., Goddard W.A., 2011. Mechanism for Degradation of Nafion in PEM Fuel Cells from Quantum Mechanics Calculations. *Journal of the American Chemical Society*, 133(49): 19857–19863. DOI: 10.1021/ja2074642.  
Zarzycki J., Prassas M., Phalippou J., 1982. Synthesis of glasses from gels: the problem of monolithic gels. *Journal of Materials Science*, 17(11): 3371–3379. DOI: 10.1007/BF01203507.

---

**Nafta-Gaz 2026, vol. 82, no. 3, pp. 270–286, DOI: 10.18668/NG.2026.03.08**

## Review and comparison of biohydrogen-producing methods

### Przegląd i porównanie metod produkcji biowodoru

Bartosz Adamczyk, Anita Zych

AGH University of Krakow

**ABSTRACT:** Biohydrogen is a promising renewable energy carrier that can be produced through various biotechnological methods, including dark fermentation, photofermentation, biophotolysis, and microbial electrolysis cells (MECs). Among these, dark fermentation stands out due to its operational simplicity, scalability, and compatibility with the existing biogas technologies. While photofermentation offers higher substrate-to-hydrogen conversion efficiency, its dependence on light and a complex reactor design limits its practical application (above 100 ml/L·h). MECs provide high-purity hydrogen but are hindered by low yields and high energy input requirements. Biophotolysis suffers from low hydrogen production rates (1–8 ml/L·h) and enzyme inhibition by oxygen. Although all methods can utilise organic waste and wastewater, dark fermentation presents the most practical solution for decentralised hydrogen production, particularly in agricultural and industrial settings. Despite lower hydrogen purity and the need for gas purification, its advantages in cost, reactor availability, and microbial flexibility make it a viable option for sustainable energy generation. Biohydrogen generated via dark fermentation can be used as fuel for proton exchange membrane fuel cells and solid oxide fuel cells after purification. This method offers hydrogen generation rates high enough (as high as 500–1000 ml/L·h) to supply enough hydrogen for small fuel cell stacks (200–2000 W), and the size of the bioreactor is still reasonable.

**Key words:** biohydrogen, waste, circular economy, dark fermentation, photofermentation, biophotolysis, microbial electrolysis cells.

**STRESZCZENIE:** Biowodór jest obiecującym odnawialnym nośnikiem energii, który może być wytwarzany różnymi metodami w tym fermentacją ciemną, fotofermentacją, biolizą oraz w technologii mikrobiologicznych ogniw elektrochemicznych (MEC). Spośród nich fermentacja ciemna wyróżnia się prostotą operacyjną, skalowalnością oraz kompatybilnością z istniejącymi technologiami biogazowymi. Chociaż fotofermentacja zapewnia wyższą efektywność konwersji substratu do wodoru, jej zależność od światła oraz złożona konstrukcja reaktorów ograniczają zastosowanie praktyczne (powyżej 100 ml/L·h). Ogniwa MEC umożliwiają uzyskanie wodoru o wysokiej czystości, jednak ograniczają je niskie uzyski oraz wysokie zapotrzebowanie energetyczne. Bioliza charakteryzuje się niskimi szybkościami produkcji wodoru (1–8 ml/L·h) oraz inhibicją enzymów przez tlen. Mimo że wszystkie metody mogą wykorzystywać odpady organiczne i ścieki, fermentacja ciemna stanowi najbardziej praktyczne rozwiązanie dla zdecentralizowanej produkcji wodoru, szczególnie w sektorze rolniczym i przemysłowym. Pomimo niższej czystości wodoru oraz konieczności jego oczyszczania, jej zalety w zakresie kosztów, dostępności reaktorów oraz elastyczności mikrobiologicznej czynią ją realną technologią zrównoważonej produkcji energii. Wodór wytwarzany w fermentacji ciemnej może być wykorzystywany jako paliwo w ogniwach paliwowych PEMFC oraz stałotlenkowych ogniwach paliwowych (SOFC) po procesie oczyszczania. Metoda ta umożliwia uzyskanie szybkości produkcji wodoru na poziomie 500–1000 ml H<sub>2</sub>/L·h, co pozwala na zasilanie małych zestawów ogniw paliwowych (200–2000 W), przy jednoczesnym zachowaniu rozsądnych rozmiarów bioreaktora.

**Słowa kluczowe:** biowodór, odpady, gospodarka o obiegu zamkniętym, ciemna fermentacja, fotofermentacja, biofotoliza, mikrobiologiczne ogniwa elektrolityczne.

### References

- Ahmad A., Krishnamoorthy R., Hasan S.W., Show P.L., Banat F., 2024. Biohydrogen production through dark fermentation: Recent trends and advances in transition to a circular bioeconomy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 52: 335–357. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.05.161.
- Albuquerque M.M., Sartor G. de B., Martinez-Burgos W.J., Scapini T., Edwiges T., Soccol C.R., Medeiros A.B.P., 2024. Biohydrogen Produced via Dark Fermentation: A Review. *Methane*, 3: 500–532. DOI: 10.3390/methane3030029.
- Al-Shorgani N.K.N., Tibin E.-M., Ali E., Hamid A.A., Yusoff W.M.W., Kalil M.S., 2014. Biohydrogen production from agroindustrial wastes via *Clostridium saccharoperbutylacetonicum* N1-4 (ATCC 13564). *Clean Technologies and Environmental Policy*, 16: 11–21. DOI: 10.1007/s10098-013-0586-6.
- Anam K., Habibi M.S., Harwati T.U., Susilaningsih D., 2012. Photofermentative hydrogen production using *Rhodobium marinum* from bagasse and soy sauce wastewater. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37: 15436–15442. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.06.076.
- Ananthi V., Bora A., Ramesh U., Yuvakkumar R., Raja K., Ponnuchamy K., Muthusamy G., Arun A., 2024. A review on the technologies for sustainable biohydrogen production. *Process Safety and Environmental Protection*, 186: 944–956. DOI: 10.1016/j.psep.2024.04.034.
- Arimbrathodi S.P., Javed M.A., Hamouda M.A., Aly Hassan A., Ahmed M.E., 2023. BioH<sub>2</sub> Production Using Microalgae: Highlights on Recent Advancements from a Bibliometric Analysis. *Water*, 15: 185. DOI: 10.3390/w15010185.

- Assawamongkholisiri T., Reungsang A., Plangkang P., Sittijunda S., 2018. Repeated batch fermentation for photo-hydrogen and lipid production from wastewater of a sugar manufacturing plant. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43: 3605–3617. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.12.119.
- Azwar M.Y., Hussain M.A., Abdul-Wahab A.K., 2014. Development of biohydrogen production by photobiological, fermentation and electrochemical processes: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31: 158–173. DOI: 10.1016/j.rser.2013.11.022.
- Bansal S.K., Sreekrishnan T.R., Singh R., 2013. Effect of Heat Pretreated Consortia on Fermentative Biohydrogen Production from Vegetable Waste. *National Academy Science Letters*, 36: 125–131. DOI: 10.1007/s40009-013-0124-4.
- Bhuiyan M.M.H., Siddique Z., 2025. Hydrogen as an alternative fuel: A comprehensive review of challenges and opportunities in production, storage, and transportation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 102: 1026–1044. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2025.01.033.
- Budiman P.M., Wu T.Y., 2016. Ultrasonication pre-treatment of combined effluents from palm oil, pulp and paper mills for improving photofermentative biohydrogen production. *Energy Conversion and Management*, 119: 142–150. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.03.060.
- Call D., Logan B.E., 2008. Hydrogen Production in a Single Chamber Microbial Electrolysis Cell Lacking a Membrane. *Environmental Science & Technology*, 42: 3401–3406. DOI: 10.1021/es8001822.
- Chaudhary A., Thakur V., Jadhav S.K., Quraishi A., 2015. Isolation and Characterization of Biohydrogen Producing Bacteria from Rice Bran with Optimization of Different Parameters. *International Journal of Biomass and Renewables*, 4: 10. DOI: 10.61762/ijbrvol4iss1art13901.
- Cheng S., Logan B.E., 2007. Sustainable and efficient biohydrogen production via electrohydrogenesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104: 18871–18873. DOI: 10.1073/pnas.0706379104.
- Das D., 2001. Hydrogen production by biological processes: a survey of literature. *International Journal of Hydrogen Energy*, 26: 13–28. DOI: 10.1016/S0360-3199(00)00058-6.
- Das S.R., Basak N., 2021. Molecular biohydrogen production by dark and photo fermentation from wastes containing starch: recent advancement and future perspective. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 44: 1–25. DOI: 10.1007/s00449-020-02422-5.
- Davila-Vazquez G., Cota-Navarro C.B., Rosales-Colunga L.M., de León-Rodríguez A., Razo-Flores E., 2009. Continuous biohydrogen production using cheese whey: Improving the hydrogen production rate. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34: 4296–4304. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2009.02.063.
- de Amorim E.L.C., Sader L.T., Silva E.L., 2012. Effect of Substrate Concentration on Dark Fermentation Hydrogen Production Using an Anaerobic Fluidized Bed Reactor. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 166: 1248–1263. DOI: 10.1007/s12010-011-9511-9.
- Ditzig J., Liu H., Logan B.E., 2007. Production of hydrogen from domestic wastewater using a bioelectrochemically assisted microbial reactor (BEAMR). *International Journal of Hydrogen Energy*, 32: 2296–2304. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2007.02.035.
- Emetere M.E., 2025. Progress, limitations, and advances of biohydrogen technologies: bringing the technology close to energy participants in developing countries. *Biofuels*, 16: 912–928. DOI: 10.1080/17597269.2025.2467493.
- Etchebehere C., Castelló E., Wenzel J., del Pilar Anzola-Rojas M., Borzacconi L., Buitrón G., Cabrol L., Carminato V.M., Carrillo-Reyes J., Cisneros-Pérez C., Fuentes L., Moreno-Andrade I., Razo-Flores E., Filippi G.R., Tapia-Venegas E., Toledo-Alarcón J., Zaiat M., 2016. Microbial communities from 20 different hydrogen-producing reactors studied by 454 pyrosequencing. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 100: 3371–3384. DOI: 10.1007/s00253-016-7325-y.
- Faraloni C., Torzillo G., Balestra F., Moia I.C., Zampieri R.M., Jiménez-Conejo N., Touloupakis E., 2025. Advances and Challenges in Biohydrogen Production by Photosynthetic Microorganisms. *Energies*, 18: 2319. DOI: 10.3390/en18092319.
- Fernandes B.S., Saavedra N.K., Maintinguer S.I., Sette L.D., Oliveira V.M., Varesche M.B.A., Zaiat M., 2013. The Effect of Biomass Immobilization Support Material and Bed Porosity on Hydrogen Production in an Upflow Anaerobic Packed-Bed Bioreactor. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 170: 1348–1366. DOI: 10.1007/s12010-013-0262-7.
- Gómez Hernández S., Sosa Villalobos C.A., Domínguez Sánchez G., Rodríguez Andrade A., Onofre Chacón L., Peñalvo López E., Valencia Salazar I., 2026. Biophotolysis as a Sustainable Tool for Biohydrogen Production: A Systematic Review. *Biotecnia*, 28: e2882. DOI: 10.18633/biotecnia.v28.2882.
- Gomez-Romero J., Gonzalez-Garcia R.A., Chairez I., Torres L., García-Peña E.I., 2016. Continuous two-staged co-digestion process for biohydrogen production from agro-industrial wastes. *International Journal of Energy Research*, 40: 257–272. DOI: 10.1002/er.3466.
- Hallenbeck P.C., Benemann J.R., 2002. Biological hydrogen production; fundamentals and limiting processes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 27: 1185–1193. DOI: 10.1016/S0360-3199(02)00131-3.
- Han W., Hu Y., Li S., Li F., Tang J., 2016a. Biohydrogen production in the suspended and attached microbial growth systems from waste pastry hydrolysate. *Bioresource Technology*, 218: 589–594. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.07.009.
- Han W., Yan Y., Shi Y., Gu J., Tang J., Zhao H., 2016b. Biohydrogen production from enzymatic hydrolysis of food waste in batch and continuous systems. *Scientific Reports*, 6: 38395. DOI: 10.1038/srep38395.
- Hassan S.H.A., Morsy F.M., 2015. Feasibility of installing and maintaining anaerobiosis using *Escherichia coli* HD701 as a facultative anaerobe for hydrogen production by *Clostridium acetobutylicum* ATCC 824 from various carbohydrates. *Enzyme and Microbial Technology*, 81: 56–62. DOI: 10.1016/j.enzmtec.2015.08.002.
- Hay J.X.W., Wu T.Y., Juan J.C., Md. Jahim J., 2017. Effect of adding brewery wastewater to pulp and paper mill effluent to enhance the photofermentation process: wastewater characteristics, biohydrogen production, overall performance, and kinetic modeling. *Environmental Science and Pollution Research*, 24: 10354–10363. DOI: 10.1007/s11356-017-8557-9.
- Hitam C.N.C., Jalil A.A., 2023. A review on biohydrogen production through photo-fermentation of lignocellulosic biomass. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13: 8465–8483. DOI: 10.1007/s13399-020-01140-y.
- Hosseini S.E., Abdul Wahid M., Jamil M.M., Azli A.A.M., Misbah M.F., 2015. A review on biomass-based hydrogen production for renewable energy supply. *International Journal of Energy Research*, 39: 1597–1615. DOI: 10.1002/er.3381.
- Hu H., Fan Y., Liu H., 2008. Hydrogen production using single-chamber membrane-free microbial electrolysis cells. *Water Research*, 42: 4172–4178. DOI: 10.1016/j.watres.2008.06.015.
- International Energy Agency, 2024. Global Hydrogen Review 2024. <<https://iea.blob.core.windows.net/assets/89c1e382-dc59-46ca-aa47-9f7d41531ab5/GlobalHydrogenReview2024.pdf>>(access 10.06.2026).
- Jafary T., Daud W.R.W., Ghasemi M., Kim B.H., Carmona-Martínez A.A., Bakar M.H.A., Jahim J.M., Ismail M., 2017. A comprehensive study on development of a biocathode for cleaner production of hydrogen in a microbial electrolysis cell. *Journal of Cleaner Production*, 164: 1135–1144. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.07.033.
- Jeremiasse A.W., Hamelers H.V.M., Saakes M., Buisman C.J.N., 2010. Ni foam cathode enables high volumetric H<sub>2</sub> production in a microbial electrolysis cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35: 12716–12723. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2010.08.131.
- Kanniah Goud R., Arunasri K., Yeruva D.K., Krishna K.V., Dahiya S., Mohan S.V., 2017. Impact of selectively enriched microbial communities on long-term fermentative biohydrogen production. *Bioresource Technology*, 242: 253–264. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.03.147.

- Kapdan I.K., Kargi F., 2006. Bio-hydrogen production from waste materials. *Enzyme and Microbial Technology*, 38: 569–582. DOI: 10.1016/j.enzmictec.2005.09.015.
- Kapdan I.K., Kargi F., Oztekin R., Argun H., 2009. Bio-hydrogen production from acid hydrolyzed wheat starch by photo-fermentation using different *Rhodobacter* sp. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34: 2201–2207. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2009.01.017.
- Karadag D., Koroğlu O.E., Ozkaya B., Cakmakci M., Heaven S., Banks C., 2014. A review on fermentative hydrogen production from dairy industry wastewater. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 89: 1627–1636. DOI: 10.1002/jctb.4490.
- Kim M.-S., Lee D.-Y., 2010. Fermentative hydrogen production from tofu-processing waste and anaerobic digester sludge using microbial consortium. *Bioresource Technology*, 101: S48–S52. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.03.040.
- Kisielewska M., Dębowski M., Zieliński M., 2015. Improvement of biohydrogen production using a reduced pressure fermentation. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 38: 1925–1933. DOI: 10.1007/s00449-015-1434-3.
- Levin D., 2004. Biohydrogen production: prospects and limitations to practical application. *International Journal of Hydrogen Energy*, 29: 173–185. DOI: 10.1016/S0360-3199(03)00094-6.
- Li S., Li F., Zhu X., Liao Q., Chang J.-S., Ho S.-H., 2022. Biohydrogen production from microalgae for environmental sustainability. *Chemosphere*, 291: 132717. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.132717.
- Li Y., Zhu J., Wu X., Miller C., Wang L., 2010. The Effect of pH on Continuous Biohydrogen Production from Swine Wastewater Supplemented with Glucose. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 162: 1286–1296. DOI: 10.1007/s12010-010-8914-3.
- Lin C.-N., Wu S.-Y., Chang Jian-Sheng, Chang Jo-Shu, 2009. Biohydrogen production in a three-phase fluidized bed bioreactor using sewage sludge immobilized by ethylene–vinyl acetate copolymer. *Bioresource Technology*, 100: 3298–3301. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.02.027.
- Liu B.-F., Ren N.-Q., Ding J., Xie G.-J., Cao G.-L., 2009. Enhanced photo-H<sub>2</sub> production of *R. faecalis* RLD-53 by separation of CO<sub>2</sub> from reaction system. *Bioresource Technology*, 100: 1501–1504. DOI: 10.1016/j.biortech.2008.08.027.
- Liu H., Grot S., Logan B.E., 2005. Electrochemically Assisted Microbial Production of Hydrogen from Acetate. *Environmental Science & Technology*, 39: 4317–4320. DOI: 10.1021/es050244p.
- Logan B.E., Call D., Cheng S., Hamelers H.V.M., Sleutels T.H.J.A., Jeremiassi A.W., Rozendal R.A., 2008. Microbial Electrolysis Cells for High Yield Hydrogen Gas Production from Organic Matter. *Environmental Science & Technology*, 42: 8630–8640. DOI: 10.1021/es801553z.
- Łukajtis R., Hołowacz I., Kucharska K., Glinka M., Rybarczyk P., Przyjazny A., Kamiński M., 2018. Hydrogen production from biomass using dark fermentation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91: 665–694. DOI: 10.1016/j.rser.2018.04.043.
- Maswana T., Phunpruch S., Lindblad P., Maneeruttanarungroj C., 2018. Enhanced hydrogen production by optimization of immobilized cells of the green alga *Tetraspora* sp. CU2551 grown under anaerobic condition. *Biomass and Bioenergy*, 111: 88–95. DOI: 10.1016/j.biombioe.2018.01.005.
- Meky N., Ibrahim M.G., Fujii M., Elreedy A., Tawfik A., 2020. Integrated dark-photo fermentative hydrogen production from synthetic gelatinaceous wastewater via cost-effective hybrid reactor at ambient temperature. *Energy Conversion and Management*, 203: 112250. DOI: 10.1016/j.enconman.2019.112250.
- Mitov M., Chorbadzhyska E., Nalbandian L., Hubenova Y., 2017. Nickel-based electrodeposits as potential cathode catalysts for hydrogen production by microbial electrolysis. *Journal of Power Sources*, 356: 467–472. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2017.02.066.
- Mu Y., Yu H.-Q., Wang G., 2007. Evaluation of three methods for enriching H<sub>2</sub>-producing cultures from anaerobic sludge. *Enzyme and Microbial Technology*, 40: 947–953. DOI: 10.1016/j.enzmictec.2006.07.033.
- Nagarajan D., Lee D.-J., Kondo A., Chang J.-S., 2017. Recent insights into biohydrogen production by microalgae – From biophotolysis to dark fermentation. *Bioresource Technology*, 227: 373–387. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.12.104.
- Nath K., Das D., 2004. Improvement of fermentative hydrogen production: various approaches. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 65: 520–529. DOI: 10.1007/s00253-004-1644-0.
- Nikolaidis P., Poullikkas A., 2017. A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67: 597–611. DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.044.
- Papazi A., Gjindali A.-I., Kastanaki E., Assimakopoulos K., Stamatakis K., Kotzabasis K., 2014. Potassium deficiency, a “smart” cellular switch for sustained high yield hydrogen production by the green alga *Scenedesmus obliquus*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39: 19452–19464. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.09.096.
- Pessiot J., Nouaille R., Jobard M., Singhania R.R., Bournilhas A., Christophe G., Fontanille P., Peyret P., Fonty G., Larroche C., 2012. Fed-batch Anaerobic Valorization of Slaughterhouse By-products with Mesophilic Microbial Consortia Without Methane Production. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 167: 1728–1743. DOI: 10.1007/s12010-011-9516-4.
- Rahman S.N.A., Masdar M.S., Rosli M.I., Majlan E.H., Husaini T., Kamarudin S.K., Daud W.R.W., 2016. Overview biohydrogen technologies and application in fuel cell technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66: 137–162. DOI: 10.1016/j.rser.2016.07.047.
- Ramos L.R., Silva E.L., 2017. Continuous Hydrogen Production from Agricultural Wastewaters at Thermophilic and Hyperthermophilic Temperatures. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 182: 846–869. DOI: 10.1007/s12010-016-2366-3.
- Rani P., Kumar Yadav D., Yadav A., Ram Bishnoi N., Kumar V., Ram C., Pugazhendhi A., Kumar S.S., 2024. Frontier in dark fermentative biohydrogen production from lignocellulosic biomass: Challenges and future prospects. *Fuel*, 366: 131187. DOI: 10.1016/j.fuel.2024.131187.
- Redwood M.D., Orozco R.L., Majewski A.J., Macaskie L.E., 2012. An integrated biohydrogen refinery: Synergy of photofermentation, extractive fermentation and hydrothermal hydrolysis of food wastes. *Bioresource Technology*, 119: 384–392. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.05.040.
- Rozendal R.A., Hamelers H.V.M., Euverink G.J.W., Metz S.J., Buisman C.J.N., 2006. Principle and perspectives of hydrogen production through biocatalyzed electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31: 1632–1640. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2005.12.006.
- Rozendal R.A., Hamelers H.V.M., Molenkamp R.J., Buisman C.J.N., 2007. Performance of single chamber biocatalyzed electrolysis with different types of ion exchange membranes. *Water Research*, 41: 1984–1994. DOI: 10.1016/j.watres.2007.01.019.
- Ruiz-Marin A., Canedo-López Y., Chávez-Fuentes P., 2020. Biohydrogen production by *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus obliquus* immobilized cultivated in artificial wastewater under different light quality. *AMB Express*, 10: 191. DOI: 10.1186/s13568-020-01129-w.
- Saratale G.D., Kshirsagar S.D., Sampange V.T., Saratale R.G., Oh S.-E., Govindwar S.P., Oh M.-K., 2014. Cellulolytic Enzymes Production by Utilizing Agricultural Wastes Under Solid State Fermentation and its Application for Biohydrogen Production. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 174: 2801–2817. DOI: 10.1007/s12010-014-1227-1.
- Seifert K., Waligorska M., Laniecki M., 2010a. Brewery wastewaters in photobiological hydrogen generation in presence of *Rhodobacter sphaeroides* O.U. 001. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35: 4085–4091. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2010.01.126.
- Seifert K., Waligorska M., Laniecki M., 2010b. Hydrogen generation in photobiological process from dairy wastewater. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35: 9624–9629. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2010.07.015.

- Sharma A.K., Ghodke P.K., Chen W.-H., Shah S.V., Patel A.K., 2025. Circular economy in biohydrogen: A state-of-the-art review on advances in sustainable production, storage, and transportation. *Journal of Cleaner Production*, 500: 145305. DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.145305.
- Si B.-C., Li J.-M., Zhu Z.-B., Zhang Y.-H., Lu J.-W., Shen R.-X., Zhang C., Xing X.-H., Liu Z., 2016. Continuous production of biohythane from hydrothermal liquefied cornstalk biomass via two-stage high-rate anaerobic reactors. *Biotechnology for Biofuels*, 9: 254. DOI: 10.1186/s13068-016-0666-z.
- Touloupakis E., Faraloni C., Silva Benavides A.M., Masojidek J., Torzillo G., 2021. Sustained photobiological hydrogen production by *Chlorella vulgaris* without nutrient starvation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46: 3684–3694. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.10.257.
- Touloupakis E., Rontogiannis G., Silva Benavides A.M., Cicchi B., Ghanotakis D.F., Torzillo G., 2016. Hydrogen production by immobilized *Synechocystis* sp. PCC 6803. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41: 15181–15186. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.07.075.
- Tripathy D.B., Pradhan S., Agarwal P., 2025. Current trends of biohydrogen production, storage and applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 196: 152530. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2025.152530.
- Vendruscolo F., 2015. Starch: a potential substrate for biohydrogen production. *International Journal of Energy Research*, 39: 293–302. DOI: 10.1002/er.3224.
- Wang H., Xu J., Sheng L., Liu X., Lu Y., Li W., 2018. A review on bio-hydrogen production technology. *International Journal of Energy Research*, 42: 3442–3453. DOI: 10.1002/er.4044.
- Wang Y.-Z., Zhang L., Xu T., Ding K., 2017. Influence of initial anolyte pH and temperature on hydrogen production through simultaneous saccharification and fermentation of lignocellulose in microbial electrolysis cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42: 22663–22670. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.07.214.
- Wongthanate J., Chinnacotpong K., Khumpong M., 2014. Impacts of pH, temperature, and pretreatment method on biohydrogen production from organic wastes by sewage microflora. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 5: 6. DOI: 10.1186/2251-6832-5-6.
- Wu Y.-R., Zhang M., Zhong M., Hu Z., 2017. Synergistic enzymatic saccharification and fermentation of agar for biohydrogen production. *Bioresource Technology*, 241: 369–373. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.05.117.
- Yang P., Zhang R., McGarvey J.A., Benemann J.R., 2007. Biohydrogen production from cheese processing wastewater by anaerobic fermentation using mixed microbial communities. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32: 4761–4771. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2007.07.038.
- Yeshanew M.M., Frunzo L., Pirozzi F., Lens P.N.L., Esposito G., 2016. Production of biohythane from food waste via an integrated system of continuously stirred tank and anaerobic fixed bed reactors. *Bioresource Technology*, 220: 312–322. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.08.078.
- Yusuf N.Y., Masdar M.S., Nordin D., Husaini T., 2015. Challenges in biohydrogen technologies for fuel cell application. *American Journal of Chemistry*, 5: 40–47. DOI: 10.5923/c.chemistry.201501.06.
- Zhang Q., Jiao Y., He C., Ruan R., Hu J., Ren J., Toniolo S., Jiang D., Lu C., Li Y., Man Y., Zhang H., Zhang Z., Xia C., Wang Y., Jing Y., Zhang X., Lin R., Li G., Yue J., Tahir N., 2024. Biological fermentation pilot-scale systems and evaluation for commercial viability towards sustainable biohydrogen production. *Nature Communications*, 15: 4539. DOI: 10.1038/s41467-024-48790-4.
- Zhang Q., Zhang Z., Wang Y., Lee D.-J., Li G., Zhou X., Jiang D., Xu B., Lu C., Li Y., Ge X., 2018. Sequential dark and photo fermentation hydrogen production from hydrolyzed corn stover: A pilot test using 11 m<sup>3</sup> reactor. *Bioresource Technology*, 253: 382–386. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.01.017.
- Zhang X., Ye X., Finneran K.T., Zilles J.L., Morgenroth E., 2013. Interactions between *Clostridium beijerinckii* and *Geobacter metallireducens* in co-culture fermentation with anthrahydroquinone-2,6-disulfonate (AH2QDS) for enhanced biohydrogen production from xylose. *Biotechnology and Bioengineering*, 110: 164–172. DOI: 10.1002/bit.24627.
- Zhu H., Fang H.H.P., Zhang T., Beaudette L.A., 2007. Effect of ferrous ion on photo heterotrophic hydrogen production by *Rhodobacter sphaeroides*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32: 4112–4118. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2007.06.010.
- Zhu S., Zhang Z., Li Y., Tahir N., Liu H., Zhang Q., 2018. Analysis of shaking effect on photo-fermentative hydrogen production under different concentrations of corn stover powder. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43: 20465–20473. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.09.150.
- Ziara R.M.M., Miller D.N., Subbiah J., Dvorak B.I., 2019. Lactate wastewater dark fermentation: The effect of temperature and initial pH on biohydrogen production and microbial community. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44: 661–673. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.11.045.

---

**Nafta-Gaz 2026, tom 82, nr 3, s. 287–295, DOI: 10.18668/NG.2026.03.09**

## Nieniszczące badania ultradźwiękowe złączy spawanych z wykorzystaniem technologii *phased array*

### Non-destructive ultrasonic testing of welded joints using Phased Array technology

Dorota Kluk

*Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy*

STRESZCZENIE: W artykule przedstawiono metodę badania złączy spawanych przy użyciu cyfrowego defektoskopu OmniScan X3 firmy Olympus oraz dedykowanej sondy PA, umożliwiającej precyzyjne obrazowanie wewnętrznej struktury spoiny i wykrywanie nieciągłości materiałowych. Szczegółowo opisano proces przygotowania próbek, obejmujący ich oczyszczenie, oznaczenie stref pomiarowych oraz dobór odpowiedniej geometrii złącza do badań ultradźwiękowych. Omówiono także dobór parametrów skanowania, takich jak zakres kątowy,

głębokość ogniskowania, krok przesuwu i konfiguracja apertury aktywnej, dostosowanych do rodzaju spoiny i oczekiwanej rozdzielczości pomiarowej. Dodatkowo przedstawiono procedury kalibracji układu pomiarowego, obejmujące ustawienia ogniskowania, korekcję prędkości i czułości, a także weryfikację poprawności ścieżki wiązki ultradźwiękowej, co zapewnia wysoką wiarygodność i powtarzalność uzyskiwanych wyników diagnostycznych. W kolejnym etapie przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych przeprowadzonych na wzorcowych blokach kalibracyjnych wykonanych ze stali węglowej, wyposażonych w standardowe wady referencyjne umożliwiające ocenę parametrów pracy układu PA. Dokonano oceny jakości uzyskanych obrazów ultradźwiękowych, analizując rozdzielczość, stosunek sygnału do szumu, dokładność odwzorowania geometrii reflektorów oraz zdolność detekcji i charakterystykę wskazań. Kalibracja układu pomiarowego defektoskopu i sondy PA posłużyła następnie do wykonania badań złączy rur poeksploatacyjnych, z uwzględnieniem zróżnicowanych własności materiałowych, obecności degradacji eksploatacyjnych oraz geometrii spoin. Zaprezentowano interpretację uzyskanych wyników, identyfikując wykryte nieciągłości, ich lokalizację oraz potencjalny wpływ na integralność konstrukcji. Otrzymane rezultaty potwierdzają wysoką skuteczność technologii *phased array* w diagnostyce złączy spawanych, zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i podczas badań elementów poeksploatacyjnych. Zrealizowany zakres prac pozwolił na wdrożenie systemu inspekcyjnego wykorzystującego technologię *phased array*, umożliwiającą szczegółowe mapowanie spoin oraz obszarów korozji w elementach konstrukcji przemysłowych. Dzięki temu rozwiązaniu możliwe jest skuteczniejsze wykrywanie trudno dostrzegalnych nieciągłości wewnętrznych materiałów, co znacząco zwiększa bezpieczeństwo eksploatacji i umożliwia precyzyjną ocenę stanu technicznego badanych komponentów.

Słowa kluczowe: defektoskop OmniScan X3, sonda *phased array*, spoiny.

**ABSTRACT:** H This article presents a method for testing welded joints using the Olympus OmniScan X3 digital flaw detector and a dedicated Phased Array (PA) probe, enabling precise imaging of the internal structure of welds and the detection of material discontinuities. The sample preparation process is described in detail, including cleaning, marking measurement zones, and selecting the appropriate joint geometry for ultrasonic testing. The selection of scanning parameters, such as angular range, focal depth, step size, and active aperture configuration, tailored to the type of weld and the desired measurement resolution, is also discussed. In addition, procedures for calibrating the measurement system are presented, including focal settings, velocity and sensitivity correction, and verification of the ultrasonic beam path, ensuring high reliability and repeatability of the diagnostic results. In the next stage, the results of laboratory tests conducted on reference calibration blocks made of carbon steel and equipped with standard reference defects for evaluating PA system performance are presented. The quality of the ultrasonic images obtained was assessed by analyzing resolution, signal-to-noise ratio, accuracy of reflector geometry representation, detection capability, and characteristic responses. The calibrated flaw detector and PA probe were then used to test welded joints of in-service pipes, taking into account diverse material properties, the presence of operational degradation, and weld geometry. The interpretation of the results obtained is presented, identifying detected discontinuities, their location, and their potential impact on structural integrity. The results confirm the high effectiveness of Phased Array technology in welded joint diagnostics, both under laboratory conditions and during the testing of in-service components. The completed scope of work enabled the implementation of an inspection system using Phased Array technology, allowing detailed mapping of welds and corrosion areas in industrial structural components. This solution facilitates more effective detection of difficult-to-identify internal material discontinuities, significantly enhancing operational safety and enabling precise assessment of the technical condition of the inspected components.

Key words: OmniScan X3 flaw detector, Phased Array sensor, welds.

## Literatura

- Alonso J., Pavón S., Vidal J., Delgado M., 2022. Advanced Comparison of Phased Array and X-Rays in the Inspection of Metallic Welding. *Materials*, 15(20): 7108. DOI: 10.3390/ma15207108.
- Arunprasath K., Naresh K., Amuthakkannan P., Manikandan V., Kavitha S., 2023. Study of low velocity impact failure responses of woven basalt fiber reinforced polymer composites using ultrasonic A, B and C scan techniques. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 9: 1356–1379. DOI: 10.1080/2374068X.2022.2118918.
- Deepak J.R., Bupesh Raja V.K., Srikanth D., Surendran H., Nickolas M.M., 2021. Non-Destructive Testing (NDT) Techniques for Low Carbon Steel Welded Joints: A Review and Experimental Study. *Materials Today: Proceedings*, 44: 3732–3737. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.11.578.
- Evans E.E., Brooks R.A., Liu J., Hall Z.E.C., Liu H., Lowe T.J.E., Withers P.J., Kinloch A.J., Dear J.P., 2024. Comparison of X-ray computed tomography and ultrasonic c-scan techniques and numerical modelling of impact damage in a CFRP composite laminate. *Applied Composite Materials*, 31, 249–264. DOI: 10.1007/s10443-023-10171-3.
- Grzyb K., Drobiec Ł., Błazy J., Zając J., 2022. The use of NDT diagnostic methods and calculations in assessing the masonry tower crowned with the steel dome. *Materials*, 15(20): 7196. DOI: 10.3390/ma15207196.
- Herceg A., Maglič L., Grizelj B., Marušić V., 2023. Comparison of Ultrasonic Phased Array and Film Radiography in Detection of Artificially Embedded Defects in Welded Plates. *Materials*, 16(9): 3579. DOI: 10.3390/ma16093579.
- Kim Y., Cho S., Park I.K., 2021. Analysis of Flaw Detection Sensitivity of Phased Array Ultrasonics in Austenitic Steel Welds According to Inspection Conditions. *Sensors*, 21(1): 242. DOI: 10.3390/s21010242.
- Kluk D., 2025. Badania możliwości zastosowania cyfrowej analizy sygnału ultradźwiękowego do oceny stanu technicznego instalacji kopalnianych. *Nafta-Gaz*, 81(7): 465–473. DOI: 10.18668/NG.2025.07.05.
- Mohd T.M.F., Echtermeyer A.T., 2024. Phased Array Ultrasonic Testing on Thick Glass Fiber Reinforced Thermoplastic Composite Pipe Implementing the Classical Time-Corrected Gain Method. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 43(3): 74. DOI: 10.1007/s10921-024-01096-3.
- Poradnik fizykochemiczny, 1974. Praca zbiorowa. PWN.
- Qiao J., Li J., Liu Ch., Li B., Huang X., 2022. Influence of near-field on the TCG calibration of phased array ultrasonic testing. *Nondestructive Testing*, 44(8): 48–53. DOI: 10.11973/wsjc202208009.
- Rana M.D., Hedden O., Cowfer D., Boyce R., 2001. Technical Basis for ASME Section VIII Code Case 2235 on Ultrasonic Examination of Welds in Lieu of Radiography. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 123(3): 338–345. DOI: 10.1115/1.1376719.
- Rawicki Ł., Krawczyk R., Ślania J., Peruń G., Golański G., Łuczak K., 2024. Analysis of the suitability of ultrasonic testing for verification of nonuniform welded joints of austenitic–ferritic sheets. *Materials*, 17(17): 4216. DOI: 10.3390/ma17174216.
- Schmerr L.W. Jr., 2015. Fundamentals of Ultrasonic Phased Arrays. *Solid Mechanics and its Applications*, 215: 1–389, Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-07272-2.

- Shaloo M., Schnall M., Klein T., Huber N., Reitingner B., 2022. A Review of Non-Destructive Testing (NDT) Techniques for Defect Detection: Application to Fusion Welding and Future Wire Arc Additive Manufacturing Processes. *Materials*, 15(10): 3697. DOI: 10.3390/ma15103697.
- Siljama O., Koskinen T., Jessen-Juhler O., Virkkunen I., 2021. Automated Flaw Detection in Multi-channel Phased Array Ultrasonic Data Using Machine Learning. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 40: 67. DOI: 10.1007/s10921-021-00796-4.
- Taheri H., Hassen A.A., 2019. Nondestructive Ultrasonic Inspection of Composite Materials: A Comparative Advantage of Phased Array Ultrasonic. *Applied Sciences*, 9(8): 1628. DOI: 10.3390/app9081628.
- Uzun H., Gustiani D., 2024. Review of Phased Array Ultrasonic Testing of Weld Joints. *Journal of Marine and Engineering Technology*, 4(2): 77–92. DOI: 10.58771/joinmet.1525521.
- Woo S.C., Shi Y., 1998. Optimization of Ultrasonic Phased Arrays. [W:] Thompson D.O., Chimenti D.E. (eds.), *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*. Springer, Boston, MA. DOI: 10.1007/978-1-4615-5339-7\_114.
- Yi W., Yun IS., 1998. The defect detection and non-destructive evaluation in weld zone of austenitic stainless steel 304 using neural network-ultrasonic wave. *KSME International Journal*, 2: 1150–1161. DOI: 10.1007/BF02942589.