Nafta-Gaz, 2026.5

Nafta-Gaz 2026, tom 82, nr 5, s. 439–450, DOI: 10.18668/NG.2026.05.01

Modelowanie geochemiczne form azotu i ich przemian w systemach wodonośnych – metody i zastosowania

Geochemical Modelling of Nitrogen Species and Their Transformations in Aquifer Systems – Methods and Applications

Aleksandra Duda

Były pracownik Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego

STRESZCZENIE: Azot należy do pierwiastków o istotnym znaczeniu dla funkcjonowania środowiska wodno-skalnego, a jego występowanie w różnych formach chemicznych jest wynikiem zachodzących w środowisku procesów fizycznych, chemicznych i biologicznych. Szczególne znaczenie w hydrogeochemii mają jon amonowy, azotany(III), azotany(V) oraz azot cząsteczkowy, których wzajemne przemiany wpływają na mobilność azotu i jakość wód podziemnych. Celem pracy jest przedstawienie podstawowych przemian geochemicznych azotu oraz charakterystyka metod modelowania umożliwiających ich ilościowy opis w systemach wodno-skalnych. Omówiono najważniejsze procesy przemian azotu, w tym amonifikację, nitryfikację, denitryfikację, dysymilacyjną redukcję azotanów do jonu amonowego (DNRA), asymilację, immobilizację oraz wiązanie azotu. Szczególną uwagę poświęcono reakcjom oksydacyjno-redukcyjnym i czynnikom geochemicznym kontrolującym ich przebieg. Przedstawiono również podstawowe rodzaje modelowania stosowane w analizie przemian azotu, obejmujące modelowanie specjacyjne, równowagowe, kinetyczne, redoks, transportowe oraz transport reaktywny. Omówiono zastosowanie programów PHREEQC, MODFLOW, MT3DMS, Visual MODFLOW, MODPATH oraz N-LES4 w modelowaniu procesów geochemicznych, przepływu wód podziemnych, migracji azotanów i określaniu źródeł obciążenia systemu azotem. Wskazano znaczenie właściwego modelu konceptualnego, jakości danych wejściowych, doboru parametrów oraz kalibracji dla wiarygodności wyników modelowania. Przedstawione zagadnienia pokazują, że ilościowy opis przemian azotu wymaga uwzględnienia wzajemnych zależności pomiędzy procesami geochemicznymi, warunkami hydrogeologicznymi i transportem substancji rozpuszczonych. Opracowanie ma charakter przeglądowy i opiera się wyłącznie na danych wtórnych pochodzących z dostępnych publikacji naukowych.

Słowa kluczowe: azot, hydrogeochemia, przemiany azotu, nitryfikacja, denitryfikacja, reakcje redoks, modelowanie geochemiczne, wody podziemne, transport reaktywny.

ABSTRACT: Nitrogen is an important element in water–rock systems, and its occurrence in different chemical forms results from physical, chemical and biological processes taking place in the environment. In hydrogeochemistry, particular importance is attributed to ammonium, nitrite, nitrate and molecular nitrogen, whose interconversions influence nitrogen mobility and groundwater quality. The aim of this paper is to present the main geochemical transformations of nitrogen and to characterize the modelling approaches that enable their quantitative description in water–rock systems. The study discusses the major nitrogen transformation processes, including ammonification, nitrification, denitrification, dissimilatory nitrate reduction to ammonium (DNRA), assimilation, immobilization and biological nitrogen fixation. Particular attention is given to redox reactions and geochemical factors controlling their occurrence and intensity. The main modelling approaches used to analyse nitrogen transformations are also presented, including speciation, equilibrium, kinetic, redox, transport and reactive transport modelling. The applications of PHREEQC, MODFLOW, MT3DMS, Visual MODFLOW, MODPATH and N-LES4 are discussed in the context of modelling geochemical processes, groundwater flow and nitrate migration, and of identifying the sources of nitrogen loads entering groundwater systems. The importance of an appropriate conceptual model, high-quality input data, adequate parameter selection and model calibration for the reliability of modelling results is emphasized. The issues discussed show that a quantitative description of nitrogen transformations requires consideration of the interactions between geochemical processes, hydrogeological conditions and solute transport. The study is a review and relies exclusively on secondary data derived from available scientific publications.

Keywords: nitrogen, hydrogeochemistry, nitrogen transformations, nitrification, denitrification, redox reactions, geochemical modelling, groundwater, reactive transport.

Literatura

Baran A., Hałas S., 2011. Badania izotopowe wód mineralnych Iwonicza-Zdroju i Lubatówki. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 444: 5–14.

Dobrzyński D., 2006. Modelowanie geochemiczne narzędziem poznania geochemii systemów wód podziemnych. Przykłady zastosowań, aktualny stan w Polsce. *Przegląd Geologiczny*, 54(11): 976–981.

Dobrzyński D., 2010. Badania potencjału redoks na przykładzie sudeckich wód leczniczych. *Przegląd Geologiczny*, 58(1): 22–26.

Dragon K., 2021. Identification of groundwater conditions in the recharge zone of regionally extended aquifer system with use of water chemistry and isotopes (Lwowek region, Poland). *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 34: 100787. DOI: 10.1016/j.ejrh.2021.100787.

Dragon K., Górski J., Burghardt D., 2022. Vertical nitrate migration and denitrification zones in a regional recharge area (Lwówek region, Poland). *Geological Quarterly*, 66(2): 15. DOI: 10.7306/gq.1647.

Dragon K., Kaczmarek P.M.J., 2017. Identyfikacja procesów denitryfikacji w rejonie obszaru zasilania ujęcia wód podziemnych Tursko B. *Przegląd Geologiczny*, 65(11/1): 1044–1048.

Duda R., Paszkiewicz M., Zdechlik R., 2008. Regionalne modelowanie migracji azotanów w zlewni rzeki karpackiej. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 431: 27–34.
Górski J., Kaźmierczak-Wijura Z., 2002. Przyczyny zmian jakości wód podziemnych ujęcia Trzaski w latach 90. *Przegląd Geologiczny*, 50(5): 424–430.
Guzik M., 2003. Związki azotu w płytkich wodach podziemnych w rejonie Lublińca. *Przegląd Geologiczny*, 51(2): 139–141.
Harbaugh A.W., 2005. MODFLOW-2005, the U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model – the Ground-Water Flow Process. *U.S. Geological Survey Techniques and Methods*, Book 6, Chapter A16.
Jóźwiak K., 2013. Konstrukcja i typowe uproszczenia w modelu geochemicznym – na przykładzie programu Phreeqc. *Przegląd Geologiczny*, 61(1): 54–61.
Jóźwiak K., 2015. Azot mineralny w płytkich wodach podziemnych Kampinoskiego Parku Narodowego. *Przegląd Geologiczny*, 63(10/1): 791–795.
Kristensen K., Waagepetersen J., Børgesen C.D., Vinther F.P., Grant R., Blicher-Mathiesen G., 2008. Reestimation and Further Development in the Model N-LES: N-LES3 to N-LES4. *DJF Plant Science*, 139.
Leśniak P.M., 2006. Frakcjonowanie trwałych izotopów azotu w obiegu naturalnym – implikacje dla badań zanieczyszczeń wód podziemnych. *Przegląd Geologiczny*, 54(7): 594–596.
Mądrala M., 2008. Modelowanie przemian składu chemicznego wód podziemnych permskiego piętra wodonośnego w rejonie lubińsko-głogowskiego obszaru miedzionośnego. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 431: 153–160.
Mądrala M., 2019. Identyfikacja źródeł mineralizacji wód podziemnych w warunkach drenażu górniczego kopalń Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego (LGOM). *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 475.
McDonald M.G., Harbaugh A.W., 1988. A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model. *U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations*, Book 6, Chapter A1.
Michalczyk T., Bar-Michalczyk D., 2015. Wyznaczanie punktów monitoringu badawczego wód podziemnych na podstawie czasu wymiany wód w zlewniach objętych badaniami modelowymi. *Przegląd Geologiczny*, 63(10/2): 1075–1079.
Michalczyk T., Bar-Michalczyk D., Kania J., Żurek A.J., 2018. Niestacjonarny model migracji azotanów w wybranej zlewni na obszarze GZWP 326 w rejonie na północ od Częstochowy. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 471: 109–116. DOI: 10.5604/01.3001.0012.5045.
Nawalany M., 2008. Modelowanie transportu substancji podlegających procesom fizykochemicznym i reakcjom chemicznym w strumieniu wód podziemnych. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 431: 169–178.
Parkhurst D.L., 1995. User's Guide to PHREEQC, a Computer Program for Speciation, Reaction-Path, Advective-Transport, and Inverse Geochemical Calculations. *U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report*, 95–4227.
Parkhurst D.L., Appelo C.A.J., 2013. Description of Input and Examples for PHREEQC Version 3: A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One-Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations. *U.S. Geological Survey Techniques and Methods*, Book 6, Chapter A43.
Porowska D., Leśniak P.M., 2008. Identyfikacja procesów kształtujących skład chemiczny wód podziemnych poniżej torfowiska – Pożary, Kampinoski Park Narodowy. *Przegląd Geologiczny*, 56(11): 982–990.
Szostakiewicz-Hołownia M., 2012. Identyfikacja procesów kształtujących chemizm wód podziemnych zlewni Potoku Białego (Tatry Zachodnie) z wykorzystaniem modeli geochemicznych. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 451: 219–226.

Nafta-Gaz 2026, tom 82, nr 5, s. 451–460, DOI: 10.18668/NG.2026.05.02

Badania parametrów technologicznych świeżych zaczynów cementowych przed procesem uszczelniania kolumn rur okładzinowych w otworach wiertniczych

Investigation of the technological parameters of fresh cement slurries prior to sealing casing strings in wellbores

Marcin Rzepka, Miłosz Kędzierski

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: Sposób, w jaki przeprowadza się cementowanie, ma zasadnicze znaczenie dla zapewnienia odpowiedniego stanu technicznego w odwiercie. Bez względu na głębokość otworu, warunki geologiczne i hydrogeologiczne oraz aspekty techniczne i technologiczne należy jak najdokładniej wypełnić zaczynem cementowym przestrzeń pierścieniową znajdującą się pomiędzy rurą okładzinową a ścianą otworu wiertniczego. Szczególne znaczenie ma zwłaszcza uszczelnianie kolumn technicznych i eksploatacyjnych z uwagi na konieczność zapewnienia optymalnej produkcji węglowodorów oraz zagwarantowanie długotrwałej i bezpiecznej eksploatacji odwiertu. W części teoretycznej artykułu omówiony został proces cementowania rur okładzinowych za pomocą głowicy cementacyjnej dwuklockowej. Przedstawiono ponadto sposoby wyznaczania podstawowych parametrów technologicznych świeżych zaczynów cementowych przed zabiegiem uszczelniania rur oraz omówiono zagadnienia związane z badaniami konsystencji zaczynu cementowego w warunkach HPHT. W części doświadczalnej zaprezentowano przykładowe receptury zaczynów cementowych opracowanych w INiG – PIB w ostatnich latach. Były to zaczyny przeznaczone do różnorakich warunków otworowych. Zaczyn o symbolu A nie zawierał specjalnych dodatków modyfikujących. Receptura zaczynu o symbolu B sporządzona była na bazie lateksu wiertniczego. Kolejne receptury, o symbolach C oraz D, zawierały nanokomponenty w postaci nano-Al_2O_3 oraz nano-SiO_2. Na podstawie uzyskanych badań można stwierdzić, że testowane w INiG – PIB zaczyny cementowe

charakteryzowały się gęstością około 1850–1910 kg/m^3. Optymalny współczynnik wodno-cementowy dla badanych zaczynów kształtował się na poziomie około 0,44–0,49. Czasy gęstnienia zaczynów można było regulować powszechnie dostępnymi środkami opóźniającymi. Na szczególną uwagę zasługują zaczyny lateksowe, przy opracowywaniu których brał udział INiG – PIB. Zaczyny te cechują się wyjątkowo korzystnymi parametrami technologicznymi i są powszechnie używane w pracach cementacyjnych, zwłaszcza w rejonie południowo-wschodniej Polski, gdzie często dochodzić może do zagrożeń związanych z ekshalacjami gazowymi. Interesującą alternatywą dla zaczynów lateksowych mogą być receptury zawierające nanokomponenty (opracowane w ostatnich latach w INiG – PIB). Zastosowanie nanoglinu czy też nanokrzemionki w zaczynach pozwala na uzyskanie wyjątkowo trwałej mikrostruktury zaczynu i znacząco podnosi wytrzymałość mechaniczną kamienia cementowego.

Słowa kluczowe: zaczyn cementowy, badania cementów wiertniczych, cementowanie otworów wiertniczych.

ABSTRACT: The manner in which cementing operations are conducted is fundamental to ensuring the proper technical condition of a wellbore. Regardless of well depth, geological and hydrogeological conditions, or technical and technological considerations, the annular space between the casing string and the borehole wall must be filled as completely as possible with cement slurry. The sealing of intermediate and production casing strings is of particular importance due to the need to ensure optimal hydrocarbon production and safe, long-term operation of the well. The theoretical part of the article discusses the process of casing cementing using a double-plug cementing head. The article also presents methods for determining the basic technological parameters of fresh cement slurries prior to the sealing procedure and discusses issues related to testing cement slurry consistency under high-pressure, high-temperature (HPHT) conditions. The experimental part presents examples of cement slurry formulations developed at the Oil and Gas Institute – National Research Institute (INiG – PIB) in recent years. These slurries were designed for various downhole conditions. Slurry A contained no special modifying additives. The formulation for slurry B was based on drilling latex. Subsequent formulations, labeled C and D, contained nanocomponents in the form of nano-Al_2O_3 and nano-SiO_2. Tests conducted at INiG – PIB showed that the cement slurries had densities ranging from approximately 1850 to 1910 kg/m^3. The optimal water-to-cement ratio for the tested slurries ranged from approximately 0.44 to 0.49. The thickening times of the slurries could be adjusted using commonly available retarders. Particularly noteworthy are the latex slurries developed with the involvement of INiG – PIB. These slurries are characterized by exceptionally favorable technological parameters and are widely used in cementing operations, particularly in southeastern Poland, where gas migration (exhalation) poses a frequent risk. Formulations containing nanocomponents, developed in recent years at INiG – PIB, may serve as an interesting alternative to latex slurries. The incorporation of nano-alumina or nano-silica into cement slurries makes it possible to achieve an exceptionally durable microstructure and significantly increases the mechanical strength of the set cement.

Keywords: slurry, testing of well cements, well cementing.

Literatura

Al-Yami A., Ramasamy J., Wagle V., 2017. Chemical Additives for Oil Well Cementing. *Research and Reviews: Journal of Chemistry*, 6(4).

Baret J.F., Le Roy-Delage S., Dargaud B., 2002. Cementing compositions and use of such compositions for cementing oil wells or the like. *U.S. Patent No. 6,458,198, October 1*.

Calvert D.J., Smith D.K., 1990. API Oilwell Cementing Practices. *OTC 6210, 22nd Annual OTC in Houston, Texas, May 7–10*. DOI: 10.4043/6210-MS.

Ciechanowska M., Twaróg W., Witek W., 1998. Ocena skuteczności cementowania rur okładzinowych. *Nafta-Gaz*, 54(4): 160–169.

Dębińska E., 2015. Niekonwencjonalne zaczyny cementowe z dodatkiem nanokrzemionki. *Nafta-Gaz*, 5: 290–300. DOI: 10.18668/NG.2015.05.03.

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. DOI: 10.31026/j.eng.2017.12.04.

Nelson E.B., Guillot D., 2006. Well Cementing, Second Edition. *Schlumberger*. ISBN-13: 978-097885300-6.

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., Kędzierski 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., Kędzierski 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., Kędzierski M., 2023. Badania zaczynów cementowych przeznaczonych do uszczelniania kolumn rur okładzinowych w podziemnych magazynach wodoru w sczerpanych złożach węglowodorów. *Nafta-Gaz*, 4: 244–251. DOI: 10.18668/ng.2023.04.

Rzepka M., Kędzierski M., 2024. Wybrane zagadnienia z nanotechnologii zaczynów cementowych stosowanych do uszczelniania otworów wiertniczych. *Monografia INiG – PIB nr 244, Kraków*. ISBN: 978-83-65649-52-2.

Rzepka M., Kędzierski M., 2025. Badania kamieni cementowych powstałych z zaczynów przeznaczonych do uszczelniania podziemnych magazynów wodoru w sczerpanych złożach węglowodorów. *Nafta-Gaz*, 5: 325–333. DOI: 10.18668/NG.2025.05.03.

Salam K.K. i in., 2013. Evaluation of Thickening Time of Oil Field Class G Cement Slurry at High Temperature and Pressure using Experimental Design International. *Journal of Engineering Sciences*, 2: 361–367.

Stryczek S., Gonet A., 2001. Wymagania odnośnie do zaczynów uszczelniających stosowanych w technologiach wiertniczych. *Sympozjum Naukowo-Techniczne „Cementy w budownictwie, robotach wiertniczych i inżynieryjnych oraz hydrotechnice", Piła-Płotki*.

Suleimanov B.A., Veliyev E.F., Aliyev A.A., 2023. Oil and Gas Well Cementing for Engineers. *John Wiley & Sons Ltd*. DOI: 10.1002/9781394164882.

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.

Akty prawne i normatywne

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

PN-EN ISO 10426-2:2006 Przemysł naftowy i gazowniczy – Cementy i materiały do cementowania otworów wiertniczych – Część 2: Badania cementów wiertniczych.

Nafta-Gaz 2026, vol. 82, no. 5, pp. 461–477, DOI: 10.18668/NG.2026.05.03

Effect of temperature and hydrogen content in gaseous fuel on the accuracy of rotary gas meters

Wpływ temperatury oraz zawartości wodoru w paliwie gazowym na dokładność gazomierzy rotorowych

Zbigniew Gacek

Oil and Gas Institute – National Research Institute, Flow Metrology Department

ABSTRACT: The transformation of the gas sector and the development of the hydrogen economy have created a need to assess the suitability of existing gas metering technologies for measuring natural gas-hydrogen mixtures and pure hydrogen. This paper presents the results of an investigation into the effects of test medium composition and temperature on the metrological performance of rotary gas meters. Three rotary gas meters were tested. The working media included E-group natural gas, natural gas–hydrogen mixtures containing 25% and 50% hydrogen by volume, and pure hydrogen. Meter errors were determined at laboratory temperature (20°C) and at gas temperatures of −25°C and 70°C. The results showed that increasing the hydrogen content mainly increased negative measurement errors at the lower end of the flow range, particularly at Q_{min}. At intermediate flow rates, the error curves approached zero, whereas at higher flow rates a tendency toward positive errors was observed for hydrogen. Both lowering the gas temperature to −25°C and increasing it to 70°C resulted in more negative meter errors at the lower end of the measuring range, with the effect being more pronounced at −25°C. The results indicate that rotary gas meters can maintain good accuracy over a substantial portion of their measuring range. However, the measurement of gas with a high hydrogen content requires particular attention to the lower limit of the measuring range and to the temperature conditions.

Keywords: hydrogen, natural gas, rotary gas meter, flow metrology, indication error, effect of temperature.

STRESZCZENIE: Transformacja sektora gazowniczego i rozwój gospodarki wodorowej powodują konieczność oceny przydatności istniejących technologii pomiarowych do pomiaru mieszanin gazu ziemnego z wodorem oraz czystego wodoru. W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu składu medium badawczego i temperatury na charakterystyki metrologiczne gazomierzy rotorowych. Badaniom poddano trzy gazomierze rotorowe. Jako medium robocze zastosowano gaz ziemny grupy E, mieszaniny gazu ziemnego i wodoru zawierające 25% i 50% *v*/*v* wodoru oraz czysty wodór. Błędy wskazań wyznaczano w temperaturze laboratorium (20°C) oraz w temperaturach gazu –25°C i 70°C. Stwierdzono, że wzrost udziału wodoru powoduje przede wszystkim pogłębienie ujemnych błędów w dolnym zakresie strumieni objętości, szczególnie w Q_{min}. W zakresie strumieni średnich charakterystyki zbliżały się do zera, natomiast przy większych strumieniach dla wodoru obserwowano tendencję do dodatnich błędów. Zarówno obniżenie temperatury do –25°C jak i wzrost do 70°C zwiększał ujemne błędy wskazań w dolnym zakresie pomiarowym, przy czym wzrost ten w temperaturze –25°C był większy. Wyniki wskazują, że gazomierze rotorowe mogą zachowywać dobrą dokładność w znacznej części zakresu pomiarowego, jednak pomiar mediów o wysokiej zawartości wodoru wymaga szczególnej oceny dolnej granicy zakresu pomiarowego oraz warunków temperaturowych.

Słowa kluczowe: wodór, gaz ziemny, gazomierz rotorowy, metrologia przepływu, błąd wskazania, wpływ temperatury.

References

Altfeld K., Pinchbeck D., 2013. Admissible Hydrogen Concentrations in Natural Gas Systems. *Gas for Energy*, 03/2013.

Bergervoet J.T.M., 2003. Spin-Offs from the development of rotary gas meters. *11th IMEKO TC9 Conference on Flow Measurement (FLOMEKO 2003) Groningen, The Netherlands, 12–14 May 2003*, 472–486.

Gacek Z., 2025. Leakage Testing of Gas Meters Designed for Measuring Hydrogen-Containing Gas Mixtures and Pure Hydrogen. *Energies*, 18, 4207. DOI: 10.3390/en18154207.

Gacek Z., Jaworski J., 2020. Optimisation of measuring system construction in the context of high flow variability. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 81, DOI: 10.1016/j.jngse.2020.103447.

Jaworski J., Kukulska-Zając E., Kułaga P., 2019. Wybrane zagadnienia dotyczące wpływu dodatku wodoru do gazu ziemnego na elementy systemu gazowniczego. *Nafta-Gaz*, 10, 625–632, DOI: 10.18668/NG.2019.10.04.

Guzzini A., Pellegrini M., Saccani C., Dudek A., Gajec M., Król A., Kulaga P., Gislon P., Cigolotti V., Robino M., Enescu D., Fernicola V.C., Smorgon D, Maury R., Gaiardo A., Valt M., Polak D., Bissig H., 2024. Hydrogen in natural gas grids: prospects and recommendations about gas flow meters. *International Journal of Hydrogen Energy*, 86, 343–362, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.08.344.

Molkov V., 2012. Hydrogen Safety Engineering: State-of-the-Art and Future Trends. *Springer, Dordrecht*. DOI: 10.1016/B978-0-08-087872-0.00418-2.

Perry R.H., Green D.W., 1999. Perry's Chemical Engineers' Handbook. *McGraw-Hill*.

Szymczyk T. [ed.], 2003. Tablice matematyczne, fizyczne, chemiczne, astronomiczne. *Świat Książki, Warszawa*.

Workamp M., Schakel M., 2021. Effect of hydrogen admixture on the accuracy of a rotary flow meter. *VSL National Metrology Institute*.

Legal acts and normative documents

[N1] PN-EN 12480:2018-06 Gazomierze. Gazomierze rotorowe.

[N2] OIML R137 1&2:2012 International Organization of Legal Metrology, Gas Meters Part 1: Metrological and Technical Requirements, Part 2: Metrological Controls and Performance Tests; International Organization of Legal Metrology: Paris, France, 2012.
[N3] PN-ISO 6976:2003 Gaz ziemny. Obliczanie wartości kalorycznych, gęstości, gęstości względnej i liczby Wobbego na podstawie składu.
[N4] PN-EN 437:2021-09 Gazy do badań. Ciśnienia próbne. Kategorie urządzeń.

Nafta-Gaz 2026, tom 82, nr 5, s. 478–490, DOI: 10.18668/NG.2026.05.04

Mikroskopia optyczna w analizie biocharu: refleksyjność, skład oraz aspekty metodyczne

Optical microscopy for biochar analysis: insights into reflectance, composition and methodological considerations

Konrad Ziemianin

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: Biochar jest bogatym w węgiel materiałem, powstającym w procesie pirolizy biomasy, który zyskuje coraz większe znaczenie w zastosowaniach środowiskowych i przemysłowych. Pomimo rosnącego zainteresowania biocharem potencjał mikroskopii optycznej w jego charakterystyce pozostaje wciąż niewystarczająco wykorzystany. Celem niniejszej pracy jest ocena przydatności mikroskopii w świetle odbitym do analizy biocharu, ze szczególnym uwzględnieniem pomiarów refleksyjności oraz analizy składu. Próbki biocharu uzyskano poprzez pirolizę biomasy (słoma, trociny) w zakresie temperatur od 500°C do 650°C i poddano szczegółowym badaniom mikroskopowym. Analizowano zmienność refleksyjności (R_o), reprezentatywność subpróbek, a także wpływ frakcji ziarnowej oraz liczby pomiarów na wiarygodność wyników. Wyniki wskazują na systematyczny wzrost średniej refleksyjności wraz ze wzrostem temperatury pirolizy, co odzwierciedla postępujący stopień uwęglenia materiału. Jednocześnie wszystkie próbki charakteryzują się wysoką heterogenicznością, przejawiającą się szerokim zakresem wartości R_o. Wykazano, że pojedyncza subpróbka, otrzymana w wyniku kruszenia i kwartowania, jest wystarczająca do uzyskania reprezentatywnych wyników zarówno w zakresie refleksyjności, jak i składu. Istotnym wynikiem pracy jest określenie minimalnej liczby pomiarów refleksyjności niezbędnej do uzyskania stabilnych wyników, wynoszącej co najmniej 350 pomiarów. Ponadto wykazano istotny wpływ frakcji ziarnowej na wyniki analiz. Połączenie analizy morfologicznej z klasyfikacją opartą na refleksyjności (podział na frakcje reaktywne i nieraktywne) umożliwia bardziej kompleksową charakterystykę biocharu. Otrzymane wyniki wskazują na duży potencjał mikroskopii optycznej jako metody wspierającej ocenę właściwości biocharu oraz standaryzację procedur analitycznych.

Słowa kluczowe: biochar, mikroskopia optyczna, refleksyjność, piroliza, heterogeniczność.

ABSTRACT: Biochar is a carbon-rich material produced through the pyrolysis of biomass, which is gaining increasing importance in environmental and industrial applications. Despite the growing interest in this material, the potential of optical microscopy for its characterization remains underutilized. The aim of this study is to evaluate the applicability of reflected light microscopy for the analysis of biochar, with particular emphasis on reflectance measurements and compositional analysis. Biochar samples were obtained in process of biomass (straw, sawdust) pyrolysis at temperatures ranging from 500°C to 650°C and subjected to detailed microscopic examination. The variability of reflectance (R_o), the representativeness of subsamples, and the influence of grain size fraction and the number of measurements on the reliability of results were analyzed. The results indicate a systematic increase in average reflectance with increasing pyrolysis temperature, reflecting the progressive carbonization of the material. At the same time, all samples exhibit high heterogeneity, manifested by a wide range of R_o values. It was demonstrated that a single subsample, obtained through crushing and quartering, is sufficient to obtain representative results in terms of both reflectance and composition. An important outcome of the study is the determination of the minimum number of reflectance measurements required to achieve consistent results, which is at least 350 measurements. Furthermore, a significant influence of grain size fraction on analytical results was observed. The combination of morphological analysis with reflectance-based classification (division into reactive and non-reactive fractions) enables a more comprehensive characterization of biochar. The obtained results indicate a high potential of optical microscopy as a method supporting the assessment of biochar properties and the standardization of analytical procedures.

Keywords: biochar, optical microscopy, reflectance, pyrolysis, heterogenity.

Literatura

Aboughaly M., Babaei-Ghazvini A., Dhar P., Patel R., Acharya B., 2023. Enhancing the potential of polymer composites using biochar as a filler: A review. *Polymers*, 15: 3981. DOI: 10.3390/polym15193981.
Cao X., Sun S., Sun R., 2017. Application of biochar-based catalysts in biomass upgrading: A review. *RSC Advances*, 7: 48793–48805. DOI: 10.1039/C7RA09307A.
Cayuela M.L., van Zwieten L., Singh B.P., Jeffery S., Roig A., Sánchez-Monedero M.A., 2014. Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: A review and meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 191: 5–16. DOI: 10.1016/j.agee.2013.10.009.
Chauhan S., Shafi T., Dubey B.K., Chowdhury S., 2023. Biochar-mediated removal of pharmaceutical compounds from aqueous matrices via adsorption. *Waste Disposal & Sustainable Energy*, 5 (1): 37–62. DOI: 10.1007/s42768-022-00118-y.
Chiaramonti D., Lotti G., Vaccari F.P., Sanei H., 2024. Assessment of long-lived carbon permanence in agricultural soil: Unearthing 15-year-old biochar from a long-term field experiment in a vineyard. *Biomass and Bioenergy*, 191: 107484. DOI: 10.1016/j.biombioe.2024.107484.
Conte P., Schmidt H.-P., 2017. Soil–water interactions unveiled by fast field cycling NMR relaxometry. *eMagRes*, 6(4): 1–12. DOI: 10.1002/9780470034590.emrstm1535.
Das C., Tamrakar S., Kiziltas A., Xie X., 2021. Incorporation of biochar to improve mechanical, thermal and electrical properties of polymer composites. *Polymers*, 13 (16): 2663. DOI: 10.3390/polym13162663.

Dissanayake P.D., You S., Igalavithana A.D., Xia Y., Bhatnagar A., Gupta S., Kua H.W., Kim S., Kwon J.-H., Tsang D.C.W., Ok Y.S., 2020. Biochar-based adsorbents for carbon dioxide capture: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119: 109582. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109582

Drobniak A., Mastalerz M., Knauth W., Ardakani O., Dos Santos T., De Faria V., Congo T., Hackley P., Hatcherian J., Hower J., Petersen H., Reyes J., Sanei H., 2024. Atlas of Microscopic Images of Biochar. *Indiana Journal of Earth Sciences*, 6. DOI: 10.14434/ijes.v6i1.37623.

Drobniak A., Mastalerz M., Liu B., Lis G., Lis K., Rudra A., Petersen H.I., Hower J., Eble C., Widziewicz-Rzońca K., 2025. Developing methodology for biochar reflectance measurements: A round robin study. *SSRN*. DOI: 10.2139/ssrn.5681664.

Edeh I.G., Mašek O., Buss W., 2020. A meta-analysis on biochar's effects on soil water properties: New insights and future research challenges. *Science of the Total Environment*, 714: 136857. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.136857.

Fortune Business Insights, 2024. Biochar market size, share, trends, growth | Forecast, (2024–2032). https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/biochar-market-100750 (dostęp: 1.09.2025).

Gholizadeh M., Hu X., 2021. Removal of heavy metals from soil with biochar composite: A critical review of the mechanism. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9: 105830. DOI: 10.1016/j.jece.2021.105830.

Giorcelli M., Khan A., Pugno N.M., Rosso C., Tagliaferro A., 2019. Biochar as a cheap and environmentally friendly filler able to improve polymer mechanical properties. *Biomass and Bioenergy*, 120: 219–223. DOI: 10.1016/j.biombioe.2018.11.036.

Godlewska P., Schmidt H.-P., Ok Y.S., Oleszczuk P., 2017. Biochar for composting improvement and contaminants reduction: A review. *Bioresource Technology*, 246, 193–202. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.07.095.

Hagemann N., Joseph S., Schmidt H., Kammann C.I., Harter J., Borch T., Young R.B., Varga K., Taherymoosavi S., Elliott K.W., Albu M., Mayrhofer C., Obst M., Conte P., Dieguez-Alonso A., Orsetti S., Subdiaga E., Behrens S., Kappler A., 2017a. Organic coating on biochar explains its nutrient retention and stimulation of soil fertility. *Nature Communications*, 8 (1): 1089–1101. DOI: 10.1038/s41467-017-01123-0.

Hagemann N., Kammann C.I., Schmidt H.-P., Kappler A., Behrens S., 2017b. Nitrate capture and slow release in biochar-amended compost and soil. *PLOS ONE*, 12(2): e0171214. DOI: 10.1371/journal.pone.0171214.

He Y., Yao Y., Ji Y., Deng J., Zhou G., Liu R., Shao J., Zhou L., Li N., Zhou X., Hosseini Bai S., 2020. Biochar amendment boosts photosynthesis and biomass in C3 but not C4 plants: A global synthesis. *GCB Bioenergy*, 12(8): 605–617. DOI: 10.1111/gcbb.12720.

He Y., Zhou X., Jiang L., Li M., Du Z., Zhou G., Shao J., Wang X., Xu Z., Hosseini Bai S., Wallace H., Xu C., 2017. Effects of biochar application on soil greenhouse gas fluxes: A meta-analysis. *GCB Bioenergy*, 9: 743–755. DOI: 10.1111/gcbb.12376.

Hosseini Bai S., Omidvar N., Gallart M., Kämper W., Tahmasbian I., Farrar M.B., Singh K., Zhou G., Muqadass B., Xu C.-Y., Koech R., Li Y., Nguyen T.T.N., van Zwieten L., 2022. Combined effects of biochar and fertilizer applications on yield: A review and meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 808: 152073. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.152073.

International Biochar Initiative, 2024. Global biochar market report 2023. https://share.google/s47MMQsEyQC6xHSgd.

Jeffery S., Verheijen F.G.A., van der Velde M., Bastos A.C., 2011. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 144(1): 175–187. DOI: 10.1016/j.agee.2011.08.015.

Kammann C.I., Schmidt H.-P., Messerschmidt N., Linsel S., Steffens D., Müller C., Koyro H.-W., Conte P., Stephen J., 2015. Plant growth improvement mediated by nitrate capture in co-composted biochar. *Scientific Reports*, 5: 11080. DOI: 10.1038/srep11080.

Kluska J., Ramotowski J., 2024. Combustion characteristics of biochar from food processing waste. *Archives of Thermodynamics*, 45(1): 45–51. DOI: 10.24425/ather.2024.150437.

Kumar S., Soomro S.A., Harijan K., Uqaili M.A., Kumar L., 2023. Advancements of biochar-based catalysts for improved production of biodiesel: *A comprehensive review. Energies*, 16 (2): 644. DOI: 10.3390/en16020644.

Laird D.A., 2008. The charcoal vision: A win–win–win scenario for simultaneously producing bioenergy, permanently sequestering carbon, while improving soil and water quality. *Agronomy Journal*, 100(1): 178–181. DOI: 10.2134/agronj2007.0161.

Lee J., Kim K.-H., Kwon E.E., 2017. Biochar as a catalyst. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77: 70–79. DOI: 10.1016/j.rser.2017.04.002.

Lehmann J., Joseph S., 2015. Biochar for environmental management: Science, technology and implementation (2nd ed.). *Routledge*.

Lehmann J., Abiven S., Kleber M., Pan G., Singh B.P., Sohi S.P., Zimmerman, A.R., 2015. Persistence of biochar in soil. [W:] Lehmann J., Joseph S. (eds.). Biochar for environmental management (2nd ed.). *Routledge*: 235–299.

Lehmann J., Gaunt J., Rondon M., 2006. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems – A review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 11: 403–427. DOI: 10.1007/s11027-005-9006-5.

Lester E., Avila C., Pang C.H., Williams O., Perkins J., Gaddipatti S., Tucker G., Barraza J.M., Trujillo-Uribe M.P., Wu T., 2018. A proposed biomass char classification system. *Fuel*, 232: 845–854. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.05.153.

Lis G.P., Drobniak A., Mastalerz M., 2026. Raman spectroscopy and reflectance as probes for structural evolution of biochar. *International Journal of Coal Geology*, 325: 105076. DOI: 10.1016/j.coal.2026.105076.

Liu Q., Zhang Y., Liu B., Amonette J.E., Lin Z., Liu G., Ambus P., Xie Z., 2018. How does biochar influence soil N cycle? A meta-analysis. *Plant and Soil*, 426(1–2): 211–225. DOI: 10.1007/s11104-018-3619-4.

Liu Z., Dugan B., Masiello C.A., Barnes R.T., Gallagher M.E., Gonnermann H., 2016. Impacts of biochar concentration and particle size on hydraulic conductivity and DOC leaching of biochar–sand mixtures. *Journal of Hydrology*, 533: 461–472. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.12.007.

Mastalerz M., Drobniak A., Briggs D., Bradburn J., 2023. Variations in microscopic properties of biomass char: Implications for biochar characterization. *International Journal of Coal Geology*, 271: 104235. DOI: 10.1016/j.coal.2023.104235.

Mastalerz M., Drobniak A., Liu B., Sauer P.E., 2025. Reflectance as an indicator of biochar permanence. *International Journal of Coal Geology,* 306: 104809. DOI: 10.1016/j.coal.2025.104809.

Peng X., Deng Y., Peng Y., Yue K., 2018. Effects of biochar addition on toxic element concentrations in plants: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 616–617: 970–977. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.10.222.

Petersen H.I., Lassen L., Rudra A., Nguyen L.X., Do P.T.M., Sanei H., 2023. Carbon stability and morphotype composition of biochars from feedstocks in the Mekong Delta, Vietnam. *International Journal of Coal Geology*, 271: 104233.

Pohlmann J.G., Osório E., Vilela A.C.F., Diez M.A., Borrego A.G., 2017. Pulverized combustion under conventional (O_2/N_2) and oxy-fuel (O_2/CO_2) conditions of biomasses treated at different temperatures. *Fuel Processing Technology*, 155: 174–182. DOI: 10.1016/j.fuproc.2016.05.025.

Pokharel P., Ma Z., Chang S.X., 2020. Biochar increases soil microbial biomass with changes in extra- and intracellular enzyme activities: A global meta-analysis. *Biochar*, 2(1): 65–79. DOI: 10.1007/s42773-020-00039-1.

Prabakar P., Mustafa Mert K., Muruganandam L., Sivagami K., 2024. A comprehensive review on biochar for electrochemical energy storage applications: An emerging sustainable technology. *Frontiers in Energy Research*, 12: 1448520. DOI: 10.3389/fenrg.2024.1448520.
Prost K., Borchard N., Siemens J., Kautz T., Séquaris J., Möller A., Amelung W., 2012. Biochar affected by composting with farmyard manure. *Journal of Environmental Quality*, 42 (1): 164–172. DOI: 10.2134/jeq2012.0064.
Qiu B., Tao X., Wang H., Li W., Ding X., Chu, H., 2021. Biochar as a low-cost adsorbent for aqueous heavy metal removal: A review. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 155: 105081. DOI: 10.1016/j.jaap.2021.105081.
Rudra A., Petersen H.I., Sanei H., 2024. Molecular characterization of biochar and the relation to carbon permanence. International *Journal of Coal Geology*, 291: 104565. DOI: 10.1016/j.coal.2024.104565.
Sadegh F., Sadegh N., Wongniramaikul W., Apiratikul R., Choodum A., 2024. Adsorption of volatile organic compounds on biochar: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 182: 559–578. DOI: 10.1016/j.psep.2023.11.071.
Sanchez-Monedero M.A., Cayuela M.L., Roig A., Jindo K., Mondini C., Bolan N., 2018. Role of biochar as an additive in organic waste composting. *Bioresource Technology*, 247: 1155–1164. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.09.193.
Sanei H., Rudra A., Przyswitt Z.M.M., Kousted S., Sindlev M.B., Zheng X., Nielsen S.B., Petersen H.I., 2024. Assessing biochar's permanence: An inertinite benchmark. *International Journal of Coal Geology*, 281: 104409. DOI: 10.1016/j.coal.2023.104409.
Sanei H., Rudra A., Zhou Z., Petersen H.I., Nilsen P.J., Chairamonti D., Nielsen S.B., 2026. A unified framework for biochar carbon permanence. *International Journal of Coal Geology*, 324, 105075. DOI: 10.1016/j.coal.2026.105075.
Sen U., Esteves B., Aguiar T., Pereira H., 2023. Removal of antibiotics by biochars: A critical review. *Applied Sciences*, 13: 11963. DOI: 10.3390/app132111963.
Seroka N.S., Luo H., Khotseng L., 2024. Biochar-derived anode materials for lithium-ion batteries: A review. *Batteries*, 10(5): 144. DOI: 10.3390/batteries10050144.
Setyawan H.Y., Sunyoto N.M.S., Choirun A., Musyaroh M., Arwani M., 2024. The potential of biochar-slurry fuel from agricultural wastes in Indonesia. *Cogent Engineering*, 11(1): 2307201. DOI: 10.1080/23311916.2024.2307201.
Su C., Zeng G.M., Gong J.L., Yang C.P., Wan J., Hu L., Hua S.S., Guo Y.Y., 2016. Impact of carbon nanotubes on the mobility of sulfonamide antibiotics in sediments in Xiangjiang River. *RSC Advances*, 6: 16941–16951. DOI: 10.1039/c5ra25201f.
Toufiq Reza M., Borrego A.G., Wirth B., 2014. Optical texture of hydrochar from maize silage and maize silage digestate. *International Journal of Coal Geology*, 134–135: 74–79. DOI: 10.1016/j.coal.2014.09.015.
Wang H., Lee S.J., Olarte M.V., Zacher A.H., 2016. Bio-oil stabilization by hydrogenation over reduced metal catalysts at low temperatures. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 4(10): 5533–5545. DOI: 10.1021/acssuschemeng.6b01270.
Wang H., Zhou P., Zhao X., 2025. Applications of biochar in fuel and feedstock substitution: A review. *Energies*, 18(17): 4511. DOI: 10.3390/en18174511.
Wang X., Guo Z., Hu Z., Zhang J., 2020. Recent advances in biochar application for water and wastewater treatment: A review. *Peer J*, 8: e9164. DOI: 10.7717/peerj.9164.
Woolf D., Amonette J.E., Street-Perrott F.A., Lehmann J., Joseph S., 2010. Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communications*, 1: 56. DOI: 10.1038/ncomms1053.
Xiong X., Yu I.K.M., Cao L., Tsang D.C.W., Zhang S., Ok Y.S., 2017. A review of biochar-based catalysts for chemical synthesis, biofuel production, and pollution control. *Bioresource Technology*, 246: 254–270. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.06.163.
Ye L., Camps-Arbestain M., Shen Q., Lehmann J., Singh B., Sabir M., 2020. Biochar effects on crop yields with and without fertilizer: A meta-analysis of field studies using separate controls. *Biochar and Sustainable Soil Management*, 36(1): 2–18. DOI: 10.1111/sum.12546.
Zhang C., Lai C., Zeng G.M., Huang D.L., Yang C.P., Wang Y., Zhou Y.Y., Cheng M., 2016. Efficacy of carbonaceous nanocomposites for sorbing ionizable antibiotic sulfamethazine from aqueous solution. *Water Research*, 95: 103–112. DOI: 10.1016/j.watres.2016.03.014.
Zhang L., Jing Y., Xiang Y., Zhang R., Lu H., 2018. Responses of soil microbial community structure changes and activities to biochar addition: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 643: 926–932. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.231.
Zimmerman A.R., Gao B., 2013. The stability of biochar in the environment. [w:] Ladygina N., Rineau F. (eds.). Biochar and soil biota. *CRC Press*: 1–40.

Nafta-Gaz 2026, vol. 82, no. 5, pp. 491–500, DOI: 10.18668/NG.2026.05.05

Research Progress, Analytical Characterization, and Environmental Assessment of CNG and LNG Utilization in Nigeria: a Comparative Review and Gap Analysis

Postęp badań, charakterystyka analityczna i ocena środowiskowa wykorzystania CNG i LNG w Nigerii: przegląd porównawczy i analiza luk badawczych

Joseph Nifu Barnabas, Noela Chinyelu Igwemmar

Department of Chemistry, Faculty of Physical Sciences, University of Abuja, Nigeria

ABSTRACT: This review assessed the published evidence on fuel-quality characterization, analytical methods, emissions, and environmental assessment of compressed natural gas (CNG) and liquefied natural gas (LNG), with emphasis on Nigeria and comparison with the United States, Qatar, Australia, and Norway. Ten parameters were assessed: gas composition, higher/lower heating value (HHV/LHV), Wobbe Index, moisture/water content, methane number, mercury, gas chromatography/gas chromatography–mass spectrometry (GC/GC-MS),

Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), methane emissions/methane slip, and life-cycle greenhouse-gas (LCA/GHG) assessment. The harmonized evidence database contained 63 retained records, while quantitative research-intensity assessment used eligible primary evidence. A predefined 0–5 scale based on eligible-study counts produced overall scores of 16/50 for Qatar, 13/50 for Norway, 9/50 for the United States, 8/50 for Australia, and 4/50 for Nigeria. Nigerian evidence was concentrated mainly on HHV/LHV, moisture/water, and methane-emission-related assessment. No eligible primary evidence was identified within the adopted evidence set for methane number, mercury, FTIR, or LCA/GHG in Nigeria, while no eligible primary evidence for GC/GC-MS was identified across the five countries. The findings indicate that Nigerian CNG/LNG literature is concentrated primarily on utilization, emissions, and techno-economic issues rather than systematic fuel-quality and advanced environmental characterization. The identified evidence gaps highlight priorities for direct fuel-quality characterization, contaminant analysis, advanced analytical monitoring, methane-emission quantification, and life-cycle assessment.

Keywords: analytical characterization, compressed natural gas (CNG), liquefied natural gas (LNG), fuel quality, methane emissions, life-cycle assessment.

STRESZCZENIE: W niniejszym przeglądzie oceniono opublikowane wyniki badań dotyczące charakterystyki jakości paliwa, metod analitycznych, emisji oraz oceny środowiskowej sprężonego gazu ziemnego (CNG) i skroplonego gazu ziemnego (LNG), ze szczególnym uwzględnieniem Nigerii na tle Stanów Zjednoczonych, Kataru, Australii i Norwegii. Analizą objęto dziesięć parametrów: skład gazu, ciepło spalania/wartość opałową (HHV/LHV), liczbę Wobbego, wilgotność/zawartość wody, liczbę metanową, zawartość rtęci, chromatografię gazową/chromatografię gazową sprzężoną ze spektrometrią mas (GC/GC-MS), spektroskopię w podczerwieni z transformacją Fouriera (FTIR), emisje metanu/emisje niespalonego metanu (ang. *methane slip*) oraz ocenę emisji gazów cieplarnianych w cyklu życia (LCA/GHG). Zharmonizowana baza źródeł zawierała 63 rekordy zakwalifikowane do analizy, natomiast ilościową ocenę intensywności badań oparto na kwalifikujących się pierwotnych danych badawczych. W zdefiniowanej z góry skali 0–5, opartej na liczbie kwalifikujących się badań, Katar uzyskał łączny wynik 16/50, Norwegia – 13/50, Stany Zjednoczone – 9/50, Australia – 8/50, a Nigeria – 4/50. Badania dotyczące Nigerii koncentrowały się głównie na HHV/LHV, wilgotności/zawartości wody oraz ocenie emisji metanu. W przyjętym zbiorze źródeł nie znaleziono dla Nigerii kwalifikujących się pierwotnych danych badawczych dotyczących liczby metanowej, rtęci, FTIR ani LCA/GHG, a w przypadku GC/GC-MS takich danych nie zidentyfikowano w żadnym z pięciu krajów. Wyniki wskazują, że nigeryjska literatura poświęcona CNG/LNG koncentruje się przede wszystkim na wykorzystaniu paliw, emisjach i zagadnieniach techniczno-ekonomicznych, a nie na systematycznej charakterystyce jakości paliwa czy zaawansowanej charakterystyce środowiskowej. Zidentyfikowane luki badawcze wskazują, że priorytetem powinny być bezpośrednia charakterystyka jakości paliwa, analiza zanieczyszczeń, zaawansowany monitoring analityczny, ilościowe określanie emisji metanu oraz ocena cyklu życia.

Słowa kluczowe: charakterystyka analityczna, sprężony gaz ziemny (CNG), skroplony gaz ziemny (LNG), jakość paliwa, emisje metanu, ocena cyklu życia.

References

Al-Khatib M., Haouari M., AlNouss A., Mkacher H., Kharbeche M., Al-Haidous S., 2024. Enhancing resilience in the liquefied natural gas supply chain: A focus on chemical supply continuity. *Energy Reports*, 12: 2758–2772. DOI: 10.1016/j.egyr.2024.08.064.

Al-Yafei H., Kucukvar M., AlNouss A., Aseel S., Onat N.C., 2021. A novel hybrid life cycle assessment approach to air emissions and human health impacts of liquefied natural gas supply chain. *Energies*, 14(19): 6278. DOI: 10.3390/en14196278.

Anthony I., Charley A., Emmanuel A., Boniface O., Chinedu U., Chukwuemeka M., 2019. Flow assurance analyses for optimum pipeline transportation of gas for use in CNG vehicles in Nigeria. *Petroleum Science and Engineering*, 3(1): 17–28. DOI: 10.11648/j.pse.20190301.14.

Barnett P.J., 2010. Life cycle assessment (LCA) of liquefied natural gas (LNG) and its environmental impact as a low carbon energy source [Bachelor's research project, University of Southern Queensland].

Bolaji D.O., Bello K.A., Bolaji B.O., 2025. An overview of the progress in the use of compressed natural gas in Nigeria. *Nafta-Gaz*, 81(6): 417–423. DOI: 10.18668/NG.2025.06.06.

Dooshima K.V., Musah A.A., 2025. The role of natural gas in Nigeria's energy transition: A management perspective for sustainable development. *Global Conference on Business and Social Sciences Proceedings*, 17(1), Paper 91. DOI: 10.35609/gcbssproceeding.2025.1(91).

Egwuogu C., Ekeh O., 2025. Technology and economics of utilizing CNG as automobile fuel in Nigeria. *International Journal of Scientific Research and Modern Technology*, 4(2): 84–99. DOI: 10.38124/ijsrmt.v4i2.294.

Emodi N.V., Emodi C.C., Murthy G.P., Emodi A.S.A., 2017. Energy policy for low carbon development in Nigeria: A LEAP model application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68(Part 1): 247–261. DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.118.

Energy Institute, 2024. Statistical review of world energy 2024 (73rd ed.). *Energy Institute*. <https://www.energyinst.org/statistical-review> (accessed: 14.10.2026).

Federal Government of Nigeria, 2022. Nigeria energy transition plan. Federal Republic of Nigeria.

International Energy Agency, 2021a. Net zero by 2050: A roadmap for the global energy sector. *OECD Publishing*. DOI: 10.1787/c8328405-en.

International Energy Agency, 2021b. World energy outlook 2021. *OECD Publishing*. DOI: 10.1787/14fcb638-en.

International Energy Agency, 2022. World energy outlook 2022. IEA. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022> (accessed: 14.10.2026).

Jin D., Xiao G., Lu Z., Weh R., McElroy L., Hu G., May E., 2026. Industrial advances in helium recovery and purification technologies: A review. *Separation and Purification Technology*, 380(Part 1): 135136. DOI: 10.1016/j.seppur.2025.135136.

Kumar S., Kwon H.-T., Choi K.-H., Lim W., Cho J.H., Tak K., Moon I., 2011. LNG: An eco-friendly cryogenic fuel for sustainable development. *Applied Energy*, 88(12): 4264–4273. DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.06.035.

Lee G.N., Kim J.M., Jung K.H., Park H., Jang H.S., Lee C.S., Lee J.W., 2022. Environmental life-cycle assessment of eco-friendly alternative ship fuels (MGO, LNG, and hydrogen) for 170 GT nearshore ferry. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(6): 755. DOI: 10.3390/jmse10060755.

Manojahri M., Kafood M., Kamal M., 2009. Liquefied natural gas: Description, risks, hazards, safeguards [Student report, CHEN 455, Texas A&M University].

Mokhatab S., Mak J.Y., Valappil J.V., Wood D. A., 2013. Handbook of liquefied natural gas. *Gulf Professional Publishing*.

Muhibbu-Din I.E., 2025. Adoption of compressed natural gas (CNG) and compressed biomethane gas (CBG) as energy and transport fuels in Nigeria: A review of safety, benefits, and implementation strategies. *Journal of Renewable Energy Engineering*, 3(2). DOI: 10.56190/jree.v3i2.50.

Nigerian Midstream and Downstream Petroleum Regulatory Authority, 2023. Nigerian gas transportation network code and midstream gas industry statistics report 2023. *NMDPRA*.
Nigerian Upstream Petroleum Regulatory Commission, 2024. Nigeria upstream petroleum industry annual statistical bulletin 2024. *NUPRC*.
Olasehinde D.A., Daser-Adams J.L., Olasehinde E.M., Ibitoye D.D., Rotimi O., Ibitoye N.S., Abioye O.M., Alhassan E.A., 2025. Risk assessment and safety management in compressed natural gas (CNG) infrastructure in Nigeria. *NIPES Journal of Science and Technology Research*, 7 (Special Issue): 785–794. DOI: 10.37933/nipes/7.4.2025.SI89.
Oyedepo S.O., 2012. On energy for sustainable development in Nigeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5): 2583–2598. DOI: 10.1016/j.rser.2012.02.010.
Reders K., Schmidt M., Schütze A., 2021. Natural gas. [In:] B. Elvers & A. Schütze (Eds.), Handbook of fuels: Energy sources for transportation (pp. 119–159). *Wiley-VCH*. DOI: 10.1002/9783527813490.ch6.
Saha D., Grappe H.A., Chakraborty A., Orkoulas G., 2016. Post-extraction separation, on-board storage, and catalytic conversion of methane in natural gas: A review. *Chemical Reviews*, 116(19): 11436–11499. DOI: 10.1021/acs.chemrev.5b00745.
Walker J., 2018. Validation of spectroscopic instruments for the direct measurement of multi-component cryogenic liquid hydrocarbons [Doctoral dissertation, Loughborough University].
Wilhelm S.M., 2009. Risk analysis for operation of aluminum heat exchangers contaminated by mercury. *Process Safety Progress*, 28(3): 259–266. DOI: 10.1002/prs.10322.
Woodward J.L., Pitblado R.M., 2010. LNG risk-based safety: Modeling and consequence analysis. *John Wiley & Sons*. DOI: 10.1002/9780470590232.

Standards

ASTM D8080-24: Standard specification for compressed natural gas (CNG) and liquefied natural gas (LNG) used as a motor vehicle fuel, 2024. ASTM International. DOI: 10.1520/D8080-24.
EN 16723-2:2017. Natural gas and biomethane for use in transport and biomethane for injection in the natural gas network – Part 2: Automotive fuels specification. CEN.
EN 16726:2025. Gas infrastructure – Quality of gas – Group H. CEN.
ISO 13686:2013. Natural gas – Quality designation. ISO.
ISO 23306:2020. Specification of liquefied natural gas as a fuel for marine applications. ISO.
ISO 6974-1:2012. Natural gas – Determination of composition and associated uncertainty by gas chromatography – Part 1: General guidelines and calculation of composition. ISO.
ISO 6976:2016. Natural gas – Calculation of calorific values, density, relative density and Wobbe indices from composition. ISO.

Legal Acts

Petroleum Industry Act, 2021 (Act No. 6 of 2021). Federal Republic of Nigeria.

Nafta-Gaz 2026, tom 82, nr 5, s. 501–512, DOI: 10.18668/NG.2026.05.06

Wpływ procesu rozpuszczalnikowego na zmianę właściwości niskotemperaturowych oleju jojoba

The effect of solvent processing on the low-temperature properties of jojoba oil

Stefan Ptak

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: Woski pochodzenia naturalnego wykorzystywane są jako surowce odnawialne i stosowane w wytwarzaniu produktów, aby obniżać negatywne skutki związane z emisją i stosowaniem szkodliwych substancji degradujących środowisko naturalne. W artykule przedstawiono ogólną charakterystykę wosków. Woski roślinne mają szerokie zastosowanie, na przykład jako składniki środków smarowych i wyrobów parafinowych oraz komponenty do paliw stosowanych w silnikach o zapłonie samoczynnym. Przedstawiono informacje, w jakich strefach klimatycznych roślina jojoba rośnie i jakie ma wymagania do uprawiania. W sposób szczegółowy opisano skład chemiczny i właściwości fizykochemiczne oraz zastosowanie oleju jojoba uzyskiwanego z owoców rośliny jojoba. W dalszej kolejności przedstawiono wyniki badań próbki wosku roślinnego, oleju jojoba, którą poddano procesowi odparafinowania rozpuszczalnikowego mieszaniną metyloizobutyloketonu z metyloetyloketonem oraz metyloizobutyloketonem. W wyniku wykonanych badań uzyskano zmodyfikowane oleje jojoba, charakteryzujące się polepszonymi właściwościami niskotemperaturowymi, oraz drugi produkt – wosk utwardzony, stanowiący frakcję pozostającą na płótnie filtracyjnym. Po usunięciu rozpuszczalnika frakcja ta charakteryzuje się podwyższonymi właściwościami temperaturowymi w porównaniu ze wsadem, tj. surowym olejem jojoba. W konkluzji stwierdzono, że zastosowanie procesu prowadzonego w warunkach analogicznych do odparafinowania rozpuszczalnikowego, standardowo stosowanego do odparafinowania olejów pochodzenia naftowego, pozwala na uzyskanie pozytywnego efektu rozdziału wsadu, którym jest olej jojoba, na dwa produkty.

Słowa kluczowe: woski roślinne, olej jojoba, odparafinowanie rozpuszczalnikowe, właściwości niskotemperaturowe, metyloizobutyloketon, metyloetyloketon.

ABSTRACT: Natural waxes are used as renewable raw materials and in the manufacture of products designed to reduce the adverse effects of emissions and the use of harmful substances that degrade the environment. This article presents an overview of the characteristics of wax-

es. Vegetable waxes have a wide range of applications, including their use as components of lubricants, paraffin products, and fuels for compression-ignition engines. Information is provided on the climatic zones in which jojoba grows and its cultivation requirements. The chemical composition, physicochemical properties, and uses of jojoba oil obtained from the fruit of the jojoba plant are described in detail. The article then presents the results of tests conducted on a sample of vegetable wax (jojoba oil) subjected to solvent dewaxing using a mixture of methyl isobutyl ketone and methyl ethyl ketone, as well as methyl isobutyl ketone alone. The tests produced modified jojoba oils with improved low-temperature properties, as well as a second product, hardened wax, consisting of the fraction retained on the filter cloth. After solvent removal, this fraction exhibits higher values for temperature-related properties than the feedstock, i.e. crude jojoba oil. It was concluded that a process carried out under conditions similar to those used in conventional solvent dewaxing of petroleum-derived oils enables the effective separation of jojoba oil feedstock into two products.

Keywords: vegetable waxes, jojoba oil, solvent dewaxing, low-temperature properties, methyl isobutyl ketone, methyl ethyl ketone.

Literatura

Al-Widyan M.I., Al-Muhtaseb M.A., 2010. Experimental investigation of jojoba as a renewable energy source. *Energy Conversion and Management*, 51: 1702–1707.

Antosz A., Ptak S., 2022. Badania możliwości powtórnego wykorzystania surowców odpadowych powstających w trakcie produkcji świec. *Nafta-Gaz*, 10: 760-775. DOI: 10.18668/NG.2022.10.07.

Bhatia V.K., Chaudhry A., Sivasankaran G.A., Bisht R.P.S., Kashyap M., 1990. Modification of Jojoba Oil for Lubricant Formulations. *Journal of the American Oil Chemists Society (JAOCS)*, 67: 1.

Bouaid A., Tardon N., Hurtado O., Marchetti J.M., 2023. Enzymatic production of sustainable jojoba fatty alcohols. A Biorefinery approach. *Food and Bioproducts Processing*, 139: 89–97. DOI: 10.1016/j.fbp.2023.03.006.

Dréau Y.L., Dupuy N., Gaydou V., Joachim J., Kister J., 2009. Study of jojoba oil aging by FTIR. *Analytica Chimica Acta*, 642: 163–170.

El Gendy S.N., Elmotayam A.K., Samir R., Ezzat M.I., El Sayed A.M., 2023. A review of the desert gold jojoba (Simmondsia chinensis) whole plant, oil, and meal: Phytochemical composition, medicinal uses, and detoxification. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 100: 591–614. DOI: 10.1002/aocs.12712.

Gallezot P., 2012. Conversion of biomass to selected chemical products. *Chemical Society Reviews*, 41: 1538–1558. DOI: 10.1039/c1cs15147a.

Heba A.G., Autumn R., Samirah H.H., Haidy A.G., Ilham T., Ahmed E.A., Osama A.K., Ashour M.L., 2021. Jojoba Oil: An Updated Comprehensive Review on Chemistry, Pharmaceutical Uses, and Toxicity. *Polymers*, 13: 1711. DOI: 10.3390/polym13111711.

Huzayyin A., 2004. Experimental evaluation of diesel engine performance and emission using blends of jojoba oil and diesel fuel. *Energy Convers Manage*, 45: 2093–2112.

Kirk-Othmer R.E., 2007. Encyclopedia of Chemical Technology. J*ohn Wiley & Sons, Inc., New York*.

Martínez P.A., García-Martínez N., del Mar Durán-del-Amor M., Quesada-Medina J., 2018. Advances on kinetics and thermodynamics of non-catalytic supercritical methanol transesterification of some vegetable oils to biodiesel. *Energy Conversion and Management*, 173: 187–196. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.07.069.

Martínez P.A., García-Martínez N., Quesada-Medina J, Román-Figueroa C., Paneque M., 2017. Synthesis of value added fatty alcohols and FAMEs by non-catalytic supercritical methanol transesterification of jojoba (Simmondsia chinensis) Wax. *Energy Conversion and Management*, 154: 430–439. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.11.028.

Meselu E.A., Thevabakthi S., Muthu A.J., 2022. The Technology of Green Chemistry and Its Function in Redox Response and: Environmentally Friendly Technology for Sustainable Development: Assessment of Recent Findings. *Advances in Chemical Engineering and Science*, 12: 131–144. DOI: 10.4236/aces.2022.123010.

Metzger O.J., 2009. Fats and oils as renewable feedstock for chemistry. *European Journal of Lipid Science and Technology,* 111: 865–876.

Mieczkowski P., Budziński B., 2018. Wpływ wosku polietylenowego na wybrane właściwości asfaltów i betonów asfaltowych. *Acta Sci. Pol. Architectura*, 17(4): 29–37. DOI: 10.22630/ASPA.2018.17.4.38.

Norma EN 590:2025. Automotive fuels. Diesel. Requirements and test methods.

Palla C., Hegel P., Pereda S., Bottin S., 2014. Extraction of Jojoba oil with liquid CO_2 + propane solvent mixtures. *Journal of Supercritical Fluids*, 91: 37–45.

Patent US4749517. Ethoxylated jojoba oil. Alcolac INC, z 7.06.1988.

Perry A., Tel-Zur N., Dag A., 2021. Vegetative and Reproductive Response to Fruit Load in Two Jojoba (Simmondsia chinensis) Cultivars. *Agronomy*, 11: 889. DOI: 10.3390/agronomy11050889.

Ptak S., 2024. Wpływ procesu odparafinowania rozpuszczalnikowego na właściwości niskotemperaturowe estrów metylowych kwasów tłuszczowych. *Rynek Energii*, 6(175): 77–87.

Ptak S., 2025. Badania wpływu procesu rozpuszczalnikowego na zmianę właściwości niskotemperaturowych estrów metylowych kwasów tłuszczowych. *Nafta-Gaz*, 8: 538–550. DOI: 10.18668/NG.2025.08.06.

Ptak S., Krasodomski W., Antosz A., Żółty M., 2024. Improvement of the low-temperature properties of vegetable oils. *Rynek Energii*, 1(170): 92–100.

Ramakrishnan C., Devan P.K., Karthikeyanc R., 2017. Experimental Study on the Performance and Emission Characteristics of Jojoba Oil Fueled DICI Engine. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 36(1): 248–258. DOI 10.1002/ep.12484.

Sánchez M., Avhad M.R., Marchetti J.M., Martínez M., Aracil J., 2016. Jojoba oil: A state of the art review and future prospects. *Energy Conversion and Management*, 129: 293–304.

Selim M.Y.E., Ghannam M.T., Abdo B.N., Attai Y.A., Radwan M.S., 2022. Raw Jojoba Oil as a Sustainable Fuel to Diesel Engines and Comparison with Diesel Fuel. *Energies*, 15: 5770. DOI: 10.3390/en15165770.

Shehata M.S., Razek A.S.M., 2011. Experimental investigation of diesel engine performance and emission characteristics using Jojoba/diesel blend and sunflower oil. *Fuel*, 90: 86–97.

Turky G.M., El-Adly R.A., 2017. Study of phase separation and anomalous molecular behavior of Jojoba oil using dielectric spectroscopy. *Journal of Molecular Liquids*, 242: 1–7.

Yang L., Takase M., Zhang M., Zhao T., Wu X., 2014. Potential non-edible oil feedstock for biodiesel production in Africa: A survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38: 461–477.

Nafta-Gaz 2026, tom 82, nr 5, s. 513–530, DOI: 10.18668/NG.2026.05.07

Wielowątkowość historii i dokonań Instytutu Nafty i Gazu – 95 lat udziału w rozwoju polskiego górnictwa naftowego

The Multifaceted History and Achievements of the Oil and Gas Institute – 95 Years of Contributions to the Development of Poland's Oil and Gas Extraction Industry

Jan Lubaś

Emerytowany, zasłużony pracownik INiG – PIB, Wieloletni Zastępca Dyrektora Pionu Eksploatacji Złóż Węglowodorów

Publikacja jest rozwinięciem tekstowym prezentacji przedstawionej na 14. Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej GEOPETROL 2026 Krynica o tym samym tytule. Pierwsza jej część nawiązuje do fragmentów publikacji (Lubaś J. 2021). Autorem niniejszej publikacji, przygotowanej na prośbę Redakcji, jest dr hab. inż Jan Lubaś, były Zastępca Dyrektora Pionu Eksploatacji Złóż Węglowodorów, Kierownik oddziału Instytutu w Krośnie. Prezentowany artykuł ma charakter przeglądowy, dotyczący historii Instytutu ściśle związanej z rozwojem przemysłu górnictwa naftowego w Polsce.

This paper is an extended written version of a presentation of the same title delivered at the 14th International Scientific and Technical Conference GEOPETROL 2026 in Krynica. Its first part draws on excerpts from an earlier publication (Lubaś, 2021). The author of this publication, prepared at the request of the Editorial Board, is Jan Lubaś, PhD Eng., former Deputy Director of the Hydrocarbon Reservoir Exploitation Division and Head of the Institute's branch in Krosno. This article was prepared as a review article on the history of the institute, which is closely linked to the development of the oil mining industry in Poland.

Literatura

Duran S., 2017. Wspomnienia o inż. Ludwiku Sockerze (1879–1932) – współtwórcy polskiego przemysłu naftowego w 85. rocznicę śmierci. *Wiek Nafty*, 2(97): 13–19.

Energy insight: A very brief history of the Energy Institute. *Energy Institute*. 17 December 2019. Retrieved 13 September 2020.

Hynowski B. (red.), 2015. Słownik Biograficzny Techników Polskich. Jubileuszowe Wydanie Specjalne. *Naczelna Organizacja Techniczna Federacji Stowarzyszeń Naukowo-Technicznych*: 178. ISBN: 9788385001379.

Jamroz St., 1928. Organizacja pracy badawczej w przemyśle naftowym. *Przemysł Naftowy*, 3: 65–68.

Jaracz Cz., Froński A., Kostecki A., Pawłoski L., Raczkowski J., Wolwowicz R., 2005. 60 lat Instytutu Nafty i Gazu. *Instytut Nafty i Gazu, Kraków*: 1–143.

Kowalewski K., 1927. Uruchomienie państwowych terenów naftowych. *Dwutygodnik Naftowy*, 8: 193–196.

Księga Pamiątkowa Instytutu Nafty i Gazu, ul. Armii Krajowej 3, 38-400 Krosno.

Lubaś J., 2007. Możliwości wzrostu stopnia sczerpania karpackich złóż ropy naftowej. *Wiadomości Naftowe i Gazownicze*, 5(109): 4–8.

Lubaś J., 2017. Wkład Instytutu Nafty i Gazu w rozwój naftowego szkolnictwa zawodowego w Polsce. *Nafta-Gaz*, 7: 518–522. DOI: 10.18668/NG.2017.07.10.

Lubaś J., 2021. Początki Instytutu Nafty i Gazu – historia dziewięćdziesięciu lat rozwoju. *Nafta-Gaz*, 11: 765–776. DOI: 10.18668/NG.2021.11.07.

Nieniewski A., 1984. Pamiętniki. Buenos Aires (maszynopis w zbiorach autora).

Praca zbiorowa, 1970. Dwadzieścia pięć lat działalności Instytutu Naftowego 1944–1969. *Wydawnictwo Śląsk, Katowice*: 20–22.

Praca zbiorowa, 2015. Z pasji do węglowodorów... 70-lecie Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego 1945–2015. *Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy, Kraków*: 1–367.

W dwudziestopięciolecie S.A. „Gazolina" 1912–1937. *Książnica-Atlas, Lwów*, s. 50.

Wais T., 2012. August Nieniewski kierownik Instytutu Przemysłu Naftowego Jasielskiego Okręgu Naftowego w Krośnie (1931–1939). *Wiek Nafty*, 2: 31.

Wolwowicz R., 1995. Historia Polskiego Przemysłu Naftowego. *Muzeum Regionalne PTTK w Brzozowie*. T. 2: 320–351. ISBN: 23-901139-9-6.