

Przyczyny utraty chłonności w odwiertach geotermalnych

Mechanisms causing injectivity decline in geothermal wells

Łukasz Kłyż, Krzysztof Nowak, Renata Cicha-Szot

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: Utrata chłonności w odwiertach geotermalnych to złożony problem, który znacząco wpływa na efektywność i trwałość eksploatacji systemów geotermalnych. Chłonność, definiowana jako zdolność otworu do przyjmowania zatłaczanej cieczy, jest kluczowym parametrem determinującym wydajność całego układu. Jej spadek może prowadzić do ograniczenia produkcji ciepła, konieczności przeprowadzania kosztownych zabiegów rekultywacyjnych, a w skrajnych przypadkach – do wyłączenia odwiertu z eksploatacji. W artykule przedstawiono klasyfikację mechanizmów prowadzących do spadku chłonności, dzieląc je na trzy główne grupy: fizyczne, chemiczne i biologiczne. Do procesów fizycznych zaliczono m.in. wzrost lepkości cieczy w wyniku wychłodzenia, kolmatację porów przez cząstki zawieszone oraz pęcznienie minerałów ilastych. Grupa procesów chemicznych obejmuje m.in.: wytrącanie osadów mineralnych, korozję elementów instalacji oraz przemiany mineralogiczne prowadzące do zmniejszenia przepuszczalności skał. Z kolei procesy biologiczne związane są z rozwojem mikroorganizmów w strefie przyodwiertowej, tworzeniem biofilmu oraz produkcją gazów, które mogą blokować przestrzeń porową. W pracy podkreślono znaczenie parametrów zatłaczanej cieczy, takich jak temperatura, ciśnienie, pH i mineralizacja solanki, które mogą intensyfikować niekorzystne zjawiska. Autorzy wskazują również na konieczność prowadzenia monitoringu oraz stosowania odpowiednich metod zapobiegawczych i regeneracyjnych, dostosowanych do konkretnego mechanizmu utraty chłonności. Zrozumienie tych procesów jest niezbędne dla projektowania trwałych i niezawodnych systemów geotermalnych, szczególnie w kontekście rosnącego zainteresowania energią odnawialną w Polsce i na świecie.

Słowa kluczowe: geotermia, dublet geotermalny, chłonność, kolmatacja, migracja cząstek.

ABSTRACT: Injectivity loss in geothermal wells is a complex issue that significantly affects the efficiency and durability of geothermal system operations. Injectivity, defined as the well's ability to accept reinjected fluid, is a key parameter determining the overall performance of the system. A decline in injectivity can lead to reduced heat production, the need for costly remediation procedures, and, in extreme cases, the abandonment of the well. This article presents a classification of the mechanisms leading to injectivity decline, dividing them into three main categories: physical, chemical, and biological processes. Physical processes include, among others, increased fluid viscosity due to cooling, pore clogging by suspended particles, and swelling of clay minerals. Chemical processes involve the precipitation of mineral deposits, corrosion of installation components, and mineralogical transformations that reduce rock permeability. Biological processes, on the other hand, are associated with the development of microorganisms in the near-wellbore zone, biofilm formation, and gas production, which can block pore spaces. The study emphasizes the importance of reinjected fluid parameters such as temperature, pressure, pH, and salinity, which can intensify adverse phenomena. The authors also highlight the necessity of continuous monitoring and the application of appropriate preventive and restorative methods tailored to the specific mechanism of injectivity loss. Understanding these processes is essential for designing durable and reliable geothermal systems, especially in the context of growing interest in renewable energy in Poland and worldwide.

Key words: geothermal energy, geothermal doublet, injectivity, pore clogging, fines migration.

Wstęp

Narastający kryzys klimatyczny oraz poszukiwanie nieemisyjnych źródeł energii przyczyniają się do wzrostu zainteresowania projektami geotermalnymi. Ten trend jest widoczny nie tylko w skali globalnej, ale również w naszym kraju (Opracowanie NIK). Prognozowany dalszy wzrost kosztów emisji gazów cieplarnianych wskazuje, że zainteresowanie

odnawialnymi źródłami energii będzie rosło. W rezultacie projekty geotermalne stają się ekonomicznie uzasadnione i odpowiadają na rosnący nacisk na ograniczenie emisji gazów cieplarnianych.

Zastępowanie konwencjonalnych źródeł energii, tj. pochodzących ze spalania paliw kopalnych, jest trudne m.in. ze względu na brak stabilności ekologicznych alternatyw. Ilość energii pozyskanej ze słońca czy wiatru nie daje się

Autor do korespondencji: Ł. Kłyż, e-mail: lukasz.klyz@inig.pl

Artykuł nadesłano do Redakcji: 03.07.2025 r. Zatwierdzono do druku: 26.11.2025 r.

przewidzieć, co wymusza budowę magazynów energii bądź zachowanie części bloków energetycznych zasilanych paliwami kopalnymi. Geotermia gwarantuje nieprzerwane dostawy energii niezależnie od pory dnia czy warunków atmosferycznych. Jej stały charakter sprawia, że jest niezawodnym źródłem, dostępnym przez całą dobę, co odróżnia ją od bardziej zmiennych źródeł.

Atutem przyczyniającym się do rozwoju geotermii jest niewielki wpływ na otaczające środowisko. Ciepłownie geotermalne – w przeciwieństwie do farm wiatrowych czy paneli fotowoltaicznych – są stosunkowo nieinwazyjne i nie wymagają konkretnej lokalizacji, nie ingerują w krajobraz. Nie stanowią zagrożenia dla ludzi ani zwierząt. Dzięki temu inwestycje geotermalne nie wzbudzają protestów lokalnej społeczności, a także możliwe jest ich rozwijanie na terenach zurbanizowanych.

Chociaż projekty geotermalne oferują obiecujące perspektywy dla produkcji energii odnawialnej, należy zauważyć, że są one nadal związane z pewnymi kosztami inwestycyjnymi i operacyjnymi. Dlatego kluczowe jest skuteczne rozwiązywanie potencjalnych problemów na etapie wczesnego planowania i realizacji projektów.

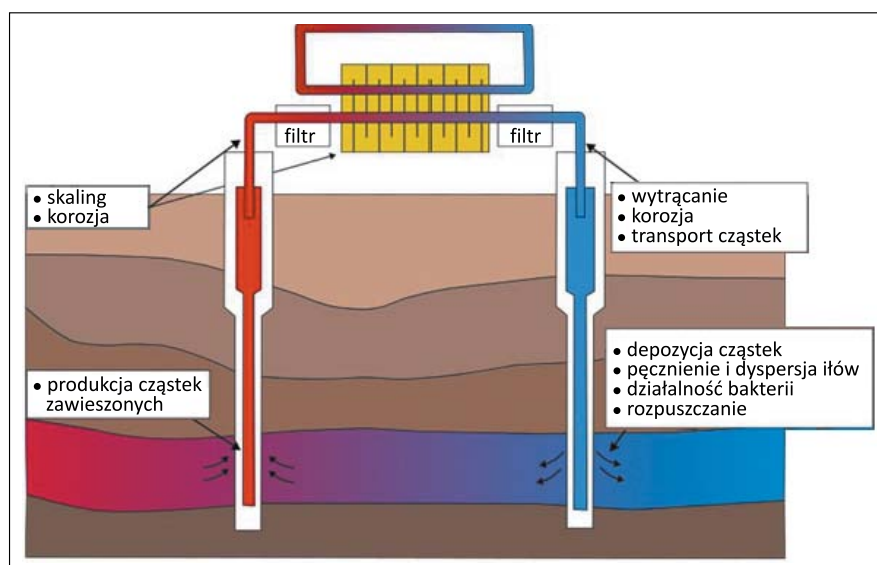
Systemy geotermalne o średniej entalpii jako nośnik energii wykorzystują solankę z warstw wodonośnych. Przepisy dotyczące ochrony środowiska nakładają na zakłady górnicze eksploatujące wody termalne obowiązek jej zagospodarowania zgodnie m.in. z Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2014 r. w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi, oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego (Sowiżdżał i in., 2017). W przypadku wód o wysokiej mineralizacji koszty uzdatniania są wysokie i bardziej opłacalne

jest zatłaczanie solanki do górotworu. Z tego powodu instalacje geotermalne zwykle projektuje się w systemie dubletów (Podstawy geotermii). Jeden z otworów eksploatuje gorącą solankę, przekazuje ją na wymienniki ciepła, a następnie drugim otworem zatłacza się solankę z powrotem do górotworu. Oprócz spełniania wymogów środowiskowych rozwiązanie to korzystnie wpływa na utrzymanie poziomu zwierciadła i ciśnienia wód w górotworze (Axelsson, 2012).

Przyczyny spadku chłonności

Pomimo istotnych korzyści iniekcja solanek do górotworu niesie też zagrożenia. Problemem znanym już z przemysłu naftowego staje się utrzymanie tempa tłoczenia wody (Civan, 2016). Określa się to mianem spadku chłonności odwiertu. Chłonność jest parametrem charakteryzującym otwory iniecyjne pod względem możliwości zatłaczania. To miara tego, jak łatwo płyn może być wstrzykiwany do złoża. Definiuje się ją jako stosunek wydatku do spadku ciśnienia w złożu (Kottsova i in., 2022). Chłonność jest zależna przede wszystkim od przepuszczalności skał i miąższości warstwy chłonnej (Budak i Szpunar, 2021).

Wydajność, z jaką prowadzi się eksploatację wody, musi być kompensowana taką samą ilością zatłaczanej wody. Możliwość wtłaczania schłodzonych wód do górotworu definiuje więc wydatek eksploatacji, a więc wydajność całego systemu geotermalnego. Wystąpienie komplikacji związanych ze spadkiem chłonności uniemożliwia pracę z założoną wydajnością, a parametry elementów tworzących infrastrukturę stają się nieadekwatne do rzeczywistych warunków pracy. Taki stan



Rysunek 1. Schemat dubletu geotermalnego z zaznaczonymi typowymi miejscami występowania niekorzystnych zjawisk (na podstawie: Luo i in., 2023, zmodyfikowane)

Figure 1. Schematic of a geothermal doublet with typical locations of adverse phenomena indicated (based on Luo et al., 2023, modified)

rzeczy wymusza rekalkulację całej inwestycji. Utrata chłonności najczęściej wynika z uszkodzenia przepuszczalności skał zbiornikowych w obrębie otworu iniekcyjnego. W celu przywrócenia chłonności konieczne jest wykonywanie kosztownych zabiegów, które zwykle mają działanie czasowe. W skrajnych przypadkach zanik możliwości zrzutu wód wymusza porzucenie odwiertu i wykonanie kolejnego.

Utrata chłonności jest złożonym zjawiskiem zależnym od wielu czynników, takich jak: budowa geologiczna, chemizm wód, konstrukcja odwiertów, układ technologiczny, warunki pracy. Zjawiska przyczyniające się do utraty chłonności zachodzą na wszystkich etapach obiegu wody (rysunek 1). Ze względu na genezę tych procesów można wyróżnić trzy grupy: fizyczne, chemiczne i biologiczne (rysunek 2). Procesy o podłożu fizycznym są związane przede wszystkim ze zmianą temperatury, ciśnienia oraz natężenia przepływu. Procesy chemiczne wywołane są substancjami chemicznymi bądź zaburzeniem stanu równowagi chemicznej. Procesy biologiczne są wynikiem działalności organizmów żywych. Istnieją jednak mechanizmy, za których powstanie odpowiedzialne mogą być procesy z różnych grup, bądź mechanizmy wywoływane

kombinacją procesów o różnym podłożu. Przykładem mechanizmu o dwojakim podłożu jest tzw. gaz *entrapment*, czyli gaz uwięziony w przestrzeni porowej (Jeong i in., 2018). Pęcherzyki gazu mogą być zarówno efektem aktywności mikroorganizmów, gazem uwolnionym z solanki, produktem reakcji chemicznej, jak też efektem nieszczelności instalacji na powierzchni terenu.

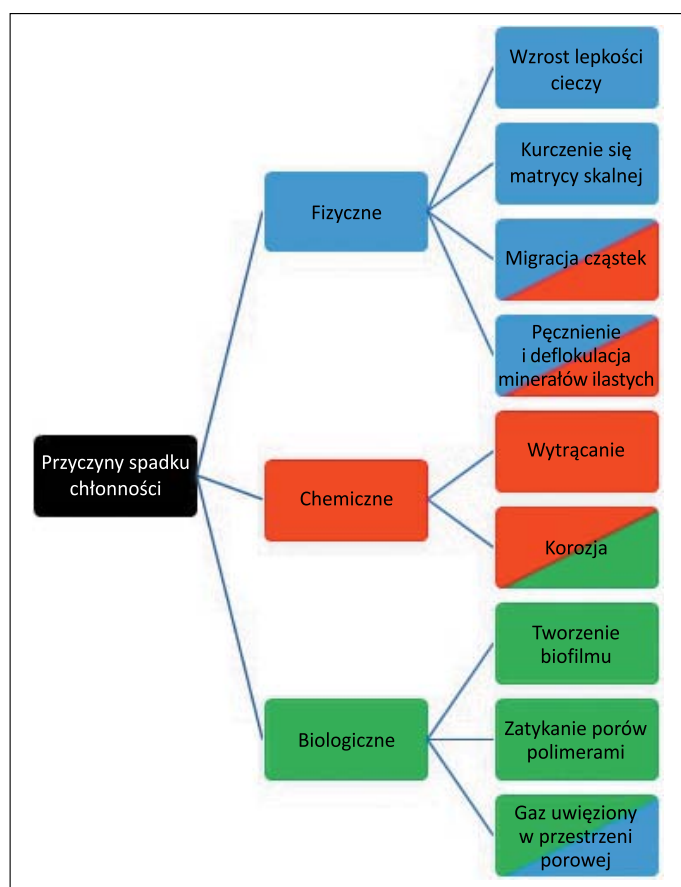
Procesy fizyczne

Praca systemu geotermalnego wiąże się z nieuchronnymi zmianami warunków panujących w górotworze. Największe modyfikacje dotyczą temperatury, ciśnienia oraz natężenia przepływu. Zmiany te i ich efekty są widoczne zwłaszcza w strefie przyodwiertowej otworu iniekcyjnego. Jednym z takich efektów jest wzrost lepkości solanki wywołany wychłodzeniem w coraz większym obszarze. Jego naturalnym następstwem jest wzrost oporów tłoczenia.

Najczęściej występującą przyczyną utraty chłonności w otworach iniekcyjnych jest kolmatacja przestrzeni porowej będąca wynikiem depozycji cząstek zawieszonych w solance (Bouwer, 2002). Ze względu na źródło pochodzenia można wyróżnić cząstki dostarczone z zewnątrz (ang. *external fine particles*) oraz cząstki zmobilizowane w strefie przyodwiertowej (ang. *internal fine particles*). Źródłem cząstek z zewnątrz jest przede wszystkim niedostatecznie przefiltrowana solanka. Osady niesione z solanką do strefy przyodwiertowej to przede wszystkim okruchy skał, związki wytrącające się z solanki oraz fragmenty instalacji dotknięte korozją (Song i in., 2020).

Mechanizm migracji cząstek jest kontrolowany głównie stosunkiem średnicy osadów do średnicy porów. Cząstki większe niż gardziele porów nie będą do tych porów wchodziły. W ten sposób powstaje tzw. placek filtracyjny na ścianie odwiertu. Cząstki o wymiarach mniejszych od zwężeń porów mogą się przemieszczać w głąb skały do momentu unieruchomienia w kanale o odpowiednio małej średnicy. Uszkodzenie przepuszczalności może wystąpić również wtedy, gdy gardziel jest większa niż średnica cząstki. Dzieje się to w efekcie tzw. mostkowania (rysunek 3). Zjawisko to występuje, gdy kilka mniejszych cząstek jednocześnie znajdzie się w zwężeniu (Bennion, 2002). Cząstki mniejsze od gardzieli porów mogą się również odkładać na ścianach porów, zmniejszając ich wymiary.

Podczas tworzenia się placka filtracyjnego wyróżnia się dwa etapy. W trakcie pierwszego etapu osad o średnicy mniejszej od gardzieli porów wnika do skały, redukując porowatość. Po nagromadzeniu odpowiednio dużej ilości osadu w ośrodku porowatym – a tym samym ograniczeniu jego zdolności filtracyjnych – osad zaczyna się akumulować na ścianie odwiertu (Fallah i in., 2016).



Rysunek 2. Procesy przyczyniające się do spadku chłonności odwiertów iniekcyjnych (na podstawie: Bennion, 2002, zmodyfikowane)

Figure 2. Processes contributing to the decline in injectivity of injection wells (based on Bennion, 2002, modified)

Do utraty przepuszczalności skał może dojść również w wyniku mobilizacji cząstek. W utworach klastycznych cząstki słabo przytwierdzone do ścian porów mogą się odrywać i przemieszczać wraz z przepływającą cieczą. Dzieje się to na skutek zaburzenia sił elektrostatycznych (Luo i in., 2023). Wartość natężenia przepływu, przy jakim występuje mierzalny spadek przepuszczalności, nazywa się prędkością krytyczną (Sharma i in., 1992). Im większe natężenie przepływu, tym efekt jest bardziej widoczny, dlatego najbardziej narażoną strefą jest obszar w bezpośrednim sąsiedztwie otworu zatłaczającego ze względu na wysoki wydatek przez stosunkowo niewielką powierzchnię. Poza natężeniem przepływu występowanie mobilizacji cząstek jest zależne od pH i mineralizacji solanki (Torkzaban i in., 2015). Najbardziej podatne na mobilizację cząstek są minerały ilaste, ze szczególnym uwzględnieniem kaolinitu (Khilar i Fogler, 1998).

Poza zagrożeniem mobilizacją cząstek obecność minerałów ilastych w skałach niesie zagrożenie ich pęcznienia. Budowa pakietowa tych minerałów pozwala na przyłączanie wody i w ten sposób zwiększanie objętości. Wzrost objętości wiąże się ze spadkiem porowatości, co niekorzystnie wpływa na własności zbiornikowe skał. Minerałem o największym potencjale pęcznienia jest smektyt (Kulesza-Wiewióra i Wiewióra, 1971). Może on zwiększyć swoją objętość kilkukrotnie. Pęcznienie minerałów ilastych jest ściśle związane ze składem chemicznym

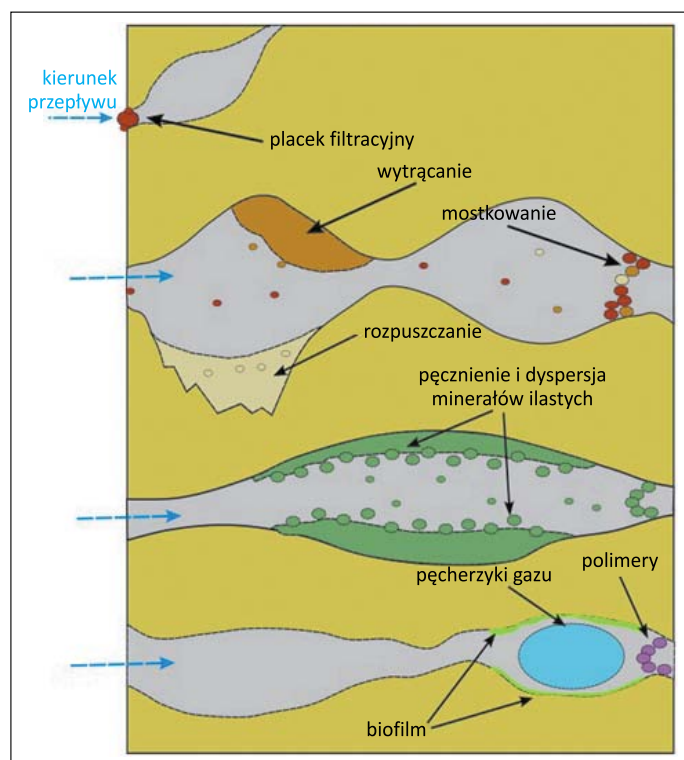
solanki, przede wszystkim z poziomem zasolenia. Spadek zasolenia powoduje wzrost pęcznienia. Poza pęcznieniem minerały ilaste mogą ulegać dyspersji. Zjawisko to jest indukowane zaburzeniem sił elektrostatycznych utrzymujących minerały ilaste. Gwałtowny spadek zasolenia, zmiana stężenia jonów dwuwartościowych z wysokiego na niskie lub gwałtowna zmiana pH mogą wywołać dyspersję (Bennion, 2002).

Problemem o podłożu fizycznym również prowadzącym do utrudnienia przepływu solanki jest wyłączenie części przestrzeni porowej z transportu solanki na skutek uwięzienia w niej gazu. Pojawia się on zwykle jako efekt działalności bakterii, w wyniku nieuszczelności infrastruktury bądź jako gaz wytrącający się z solanki.

Procesy chemiczne

Najważniejszym czynnikiem prowadzącym do utraty chłonności w wyniku reakcji chemicznych jest zaburzenie równowagi chemicznej (Kottsova i in., 2022). Eksploatacja solanki i odbiór ciepła są związane z obniżeniem temperatury oraz ciśnienia. Zmiany te skutkują wytrącaniem się słabo rozpuszczalnych soli, tlenków, wodorotlenków oraz uwalnianiem gazu rozpuszczonego w solance. Co więcej, takie zmiany mogą prowadzić do reakcji wtórnych. Przykładem takiego zjawiska jest wytrącanie kalcytu spowodowane zmianą odczynu pH w wyniku uwolnienia części rozpuszczonego CO_2 (Eppner i in., 2017). Zatłaczanie wód o zmienionych parametrach może prowadzić do rozpuszczania niektórych minerałów, co samo w sobie działa korzystnie na warunki zbiornikowe, zwiększając porowatość, jednakże wiąże się również z niebezpieczeństwem uwolnienia cząstek, których migracja z solanką w głąb złoża może powodować kolmatację. Zmiana zasolenia oraz pH przyczynia się również do zaburzenia sił elektrostatycznych i mobilizacji cząstek.

Istotnym problemem w systemach geotermalnych jest korozja. To proces niszczenia metalu w wyniku reakcji pomiędzy metalami w systemach technicznych (np. rurach) a solankami geotermalnymi. Korozję można podzielić ze względu na czynniki, które wywołują reakcje chemiczne – są to między innymi CO_2 , H_2S , NH_3 lub H_2 . Korozja występuje najczęściej w dłuższym okresie, w tempie zależnym od pH i temperatury solanki, jak również od odporności stali. Przy czym zazwyczaj im wyższa temperatura i mniejsze pH, tym reakcje te przebiegają szybciej (Ghaziof i in., 2017; Penot i in., 2023). Jeśli produkty korozji nie zostaną całkowicie odfiltrowane, mogą one dalej migrować z przepływem płynu do złoża i stać się źródłem zapychania jako drobne cząstki zewnętrzne. Dodatkowym czynnikiem wpływającym na spadek chłonności skał są przemiany minerałów. Reakcje chemiczne



Rysunek 3. Główne mechanizmy prowadzące do utraty chłonności (na podstawie: Kottsova i in., 2022)

Figure 3. Key mechanisms contributing to the loss of injectivity (based on Kottsova et al., 2022)

zachodzące w trakcie użytkowania odwiertu mogą prowadzić do transformacji minerałów pierwotnych na fazy o mniejszej przepuszczalności, cechujące się pęcznieniem pod wpływem wody i większą objętością. Jak wykazały badania laboratoryjne przeprowadzone przez Gan i in. (2022a, 2022b), albit może ulegać konwersji do montmorylonitu. Powoduje to zmiany struktury porowej i obniżenie jej przepuszczalności. Innymi przykładami takich transformacji są przemiany anhydrytu w gips, dolomityzacja czy serpentynizacja.

Ponadto przy wysokich wartościach pH może wystąpić powstawanie drobnych cząsteczek generowanych w obecności wodorotlenku alkalicznego. Jest to efekt przemiany kaolinitu w dikit, nakryt i haloizyt w procesie utleniania chemicznego (Hayatdavoudi i Ghalambor, 1998).

Procesy biologiczne

Wychłodzona strefa przyodwiertowa odwiertu iniekcyjnego jest sprzyjającym środowiskiem do życia bakterii. Najczęściej występujące grupy tych organizmów to bakterie redukujące siarczany, nityfikacyjne i żelazowe. Zasięg ich występowania w strefie przyodwiertowej zwykle nie przekracza kilku centymetrów w głąb poziomu zbiornikowego. Obniżona temperatura i stała dostawa składników odżywczych takich jak związki węgla, azotu i fosforu sprzyjają ich rozwojowi (Wingender i in., 1999). Obecność mikrobów wiąże się również z powstawaniem biofilmu, czyli kolonii mikroorganizmów zagnieżdżonych w substancji organicznej oraz nagromadzonych metabolitów. Głównym produktem jest tu lepki polimer, który zapewniając środowisko ochronne kolonom bakterii, jednocześnie blokuje kanały migracji wód złożowych (Torkzaban i in., 2015). Inne produkty powstające w wyniku bytności bakterii to gazy takie jak CO₂ i H₂S. Obecność pęcherzyków gazów w przestrzeni porowej blokuje przepływ wód złożowych do momentu ich rozpuszczenia się w solance. Gazy te ponadto w znacznym stopniu przyczyniają się do powstawania korozji, a po rozpuszczeniu zmieniają pH solanki, przesuwając stan równowagi chemicznej.

Podsumowanie

Utrata chłonności w systemach geotermalnych jest powszechnym zjawiskiem o złożonym pochodzeniu, dlatego nie ma uniwersalnych rozwiązań tego problemu. Wystąpienie niekorzystnych zjawisk może wynikać z budowy geologicznej, chemizmu wód, błędów konstrukcyjnych przy projektowaniu infrastruktury bądź stanowić wypadkową kilku czynników. Obecnie zauważamy w Polsce duże zainteresowanie dotacjami do budowy zakładów geotermalnych (Rozwój geotermii

w Polsce). Wyzwaniem w przyszłości będzie utrzymanie wydajności wielu z tych obiektów. Jest to jednocześnie niepowtarzalna szansa na rozwój wiedzy i wypracowanie metod zapobiegania niekorzystnym zjawiskom w systemach geotermalnych.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Analiza potencjalnych czynników wpływających na spadek chłonności w otworach geotermalnych*, praca INiG – PIB; nr zlecenia: 0025/SI/2023, nr archiwalny: DK-4100-0008/2023.

Literatura

- Axelsson G., 2012. Role and management of geothermal reinjection. *Short Course on*, 1–21.
- Bennion D.B., 2002. An overview of formation damage mechanisms causing a reduction in the productivity and injectivity of oil and gas producing formations. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 41(11): 29–36. DOI: 10.2118/02-11-DAS.
- Bouwer H., 2002. Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering. *Hydrogeology Journal*, 10(1): 121–142. DOI: 10.1007/s10040-001-0182-4.
- Budak P., Szpunar T., 2021. Ocena możliwości zrzutu zasolonych wód poeksploatacyjnych do wyeksploatowanych odwiertów. *Nafta-Gaz*, 77(11): 752–759. DOI: 10.18668/NG.2021.11.05.
- Civan F., 2016. Reservoir formation damage. 3rd ed. *Elsevier, Amsterdam*. DOI: 10.1016/B978-0-12-801898-9.00002-3.
- Eppner F., Pasquier P., Baudron P., 2017. A coupled thermo-hydro-geochemical model for standing column well subject to CO₂ degassing and installed in fractured calcareous aquifers. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 11: 14–27. DOI: 10.1016/j.gete.2017.05.003.
- Fallah H., Afkhami M., Ahmadi A., Jalali R., 2016. Reservoir formation damage due to water injection wells. *Journal of Applied Science*, 2(4): 6–10.
- Gan H., Liu Z., Wang G., Liao Y., Wang X., Zhang Y., Liu Z., 2022a. Permeability and porosity changes in sandstone reservoir by geothermal fluid reinjection: insights from a laboratory study. *Water*, 14(19): 3131. DOI: 10.3390/w14193131.
- Gan H., Liu Z., Wang X., Zhang Y., Liao Y., Zhao G., Liu Z., 2022b. Effect of temperature and acidification on reinjection of geothermal water into sandstone geothermal reservoirs: laboratory study. *Water*, 14(19): 2955. DOI: 10.3390/w14192955.
- Ghaziof S., Dudley R., Julian R., Ko M., Lichti K., 2017. H₂S corrosion of carbon steel in geothermal fluids. *Proceedings of the 39th New Zealand Geothermal Workshop, Rotorua: International Geothermal Association*, 1.
- Hayatdavoudi A., Ghalambor A., 1998. Controlling formation damage caused by kaolinite clay minerals: part II. *SPE International Conference and Exhibition on Formation Damage Control, Lafayette, Louisiana*. DOI: 10.2118/39464-MS.
- Jeong H.Y., Jun S.C., Cheon J.Y., Park M., 2018. A review on clogging mechanisms and managements in aquifer storage and recovery (ASR) applications. *Geosciences Journal*, 22: 667–679. DOI: 10.1007/s12303-017-0073-x.
- Khilari K.C., Fogler H.S., 1998. Migration of fines in porous media. *Kluwer Academic Publishers, Dordrecht–Boston–London*. DOI: 10.1007/978-94-015-9074-7.
- Kottsova A., Bruhn D., Saar M., Veeger F., Brehme M., 2022. Clogging mechanisms in geothermal operations: theoretical examples and an applied study. *Conference: European Geothermal Congress 2022, Berlin, Germany*.

- Kulesza-Wiewióra K., Wiewióra A., 1971. Pęcznienie minerałów ilastych pod wpływem wody i cieczy organicznych. *Przegląd Geologiczny*, 19(1): 12–15.
- Luo A., Kottsova P.J., Vardon A.C., Dieudonné M., 2023. Mechanisms causing injectivity decline and enhancement in geothermal projects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 185: 113623. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113623.
- Penot C., Martelo D., Paul S., 2023. Corrosion and scaling in geothermal heat exchangers. *Applied Sciences*, 13(20): 11549. DOI: 10.3390/app132011549.
- Sharma M.M., Chamoun H., Sarma D.S.H.S.R., Schechter R.S., 1992. Factors controlling the hydrodynamic detachment of particles from surfaces. *Journal of Colloid and Interface Science*, 149: 121–134. DOI: 10.1016/0021-9797(92)90398-6.
- Song W., Liu X., Zheng T., Yang J., 2020. A review of recharge and clogging in sandstone aquifer. *Geothermics*, 87: 101857.
- Sowizdzał A., Tomaszewska B., Drabik A., 2017. Environmental aspects of the geothermal energy utilisation in Poland. *E3S Web of Conferences*, 22: 00164. DOI: 10.1051/e3sconf/20172200164.
- Torkzaban S., Vanderzalm J., Treumann S., Amirianshoja T., 2015. Understanding and quantifying clogging and its management during re-injection of CSG water permeates, brines and blends. *CSIRO Final Report*.
- Wingender J., Neu T.R., Flemming H.-C., 1999. Microbial extracellular polymeric substances. *Springer, Berlin–Heidelberg*. DOI: 10.1007/978-3-642-60147-7.

Strony internetowe

- Opracowanie NIK. <<https://www.nik.gov.pl/aktualnosci/energia-wod-termalnych.html>> (dostęp: 15.12.2023).
- Podstawy geotermii. <<https://energia-geotermalna.org.pl/podstawy-geotermii/>> (dostęp: 15.12.2023).
- Rozwój geotermii w Polsce. <<https://wysokienapiecie.pl/97578-geotermia-w-polsce-powoli-wchodzi-do-systemow-cieplowniczych/>> (dostęp: 20.07.2024).



Mgr Krzysztof NOWAK
Specjalista inżynieryjno-techniczny w Zakładzie Geologii i Geochemii
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: nowakk@inig.pl



Mgr inż. Łukasz KŁYŻ
Specjalista inżynieryjno-techniczny w Zakładzie Inżynierii Naftowej
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: lukasz.klyz@inig.pl



Dr inż. Renata CICHA-SZOT
Adiunkt, Kierownik Zakładu Inżynierii Naftowej
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: renata.cicha-szot@inig.pl