

Wpływ parametrów sprężystych skał na proces hydraulicznego szczelinowania dla potrzeb wspomaganych systemów geotermalnych (EGS) na terenie Polski

Autor:

mgr Rafał Moska

Promotor:

prof. dr hab. Krzysztof Labus

Opiekun ze strony przedsiębiorstwa:

dr hab. inż. Piotr Kasza, prof. INiG-PIB

Streszczenie

Wśród rozwijanych obecnie technologii niskoemisyjnych źródeł produkcji energii jednym z największych potencjałów charakteryzują się wspomagane systemy geotermalne, ang. *Enhanced Geothermal Systems* (EGS). Tworzone są one w tzw. gorących suchych skałach, ang. *hot dry rocks* (HDR) – formacjach zalegających zazwyczaj poniżej 4000 metrów, w warunkach wysokich ciśnień i temperatur. Charakteryzują się one bardzo niską przepuszczalnością, porowatością i najczęściej nie zawierają wody lub zawierają jej bardzo małe ilości. Z tego względu ich energia termiczna nie może być transportowana na powierzchnię w taki sposób, w jaki ma to miejsce w konwencjonalnych systemach geotermalnych. Odpowiedzią na problemy z dostępnością do energii skał typu HDR jest sztuczne wytworzenie lub zwiększenie w tych formacjach przewodności hydraulicznej, osiągane najczęściej dzięki wykorzystaniu technologii hydraulicznego szczelinowania (HF). W efekcie tworzony jest system geotermalny, w którym ciecz robocza krąży w obiegu zamkniętym: najpierw tłoczona jest otworem chłonnym do górotworu, nagrzewa się przepływając przez wytworzone lub reaktywowane w HDR szczeliny, a następnie po ogrzaniu jest wydobywana na powierzchnię gdzie jej ciepło jest wykorzystywane do produkcji energii cieplnej i/lub elektrycznej. Schłodzona ciecz jest powtórnie zatłaczana do złoża. Projekty EGS rozwijane są na świecie od lat 70 XX wieku, a komercyjne elektrownie wykorzystujące tą technologię funkcjonują obecnie m.in. we Francji i Niemczech. W Polsce od początku XXI wieku wzrasta zainteresowanie tą niekonwencjonalną gałęzią geotermii, co zaowocowało realizacją projektów naukowych i powstaniem szeregu publikacji. Pomimo szerokiego spektrum badawczego części z tych prac, ich efekty nie były ukierunkowane na opracowanie jakichkolwiek elementów technologicznych zabiegów HF w polskich formacjach HDR. Odpowiedzią na tą lukę badawczą jest niniejsza praca doktorska.

Działania badawcze zrealizowane w ramach rozprawy doktorskiej można podzielić na dwie części: (1) badania laboratoryjne na próbkach skalnych pobranych z perspektywicznych dla EGS obszarów na terenie Polski, poprzedzone rozszerzoną analizą literaturową w aspekcie kluczowych elementów technologii HF w systemach EGS oraz (2) symulacje komputerowe

zabiegów HF wraz z oceną wpływu parametrów sprężystości skał na geometrię szczelin hydraulicznych.

W przeprowadzonym przeglądzie literaturowym przeanalizowano najważniejsze projekty EGS prowadzone dotychczas na świecie pod kątem parametrów geologicznych, petrofizycznych, tektonicznych oraz elementów technologii HF w nich wykorzystanych. Przegląd ten pozwolił określić cechy zabiegów HF charakterystyczne dla geotermii wspomaganej, geometrię szczelin w kolektorach oraz zakresy parametrów zabiegowych stosowane w realizowanych projektach. Uzyskane informacje odniesiono do warunków charakterystycznych dla perspektywicznych formacji w Polsce. Na podstawie przeprowadzonych prac wydany został artykuł w czasopiśmie *Energies* (Moska i inni, 2021).

Wykonano także uzupełniający przegląd literatury, rozbudowując zagadnienia dotyczące obszarów perspektywicznych dla technologii EGS w Europie o kraje bałtyckie (Litwę, Łotwę Estonię) oraz porównanie warunków geologicznych do warunków Polskich. Praca ta została opublikowana w czasopiśmie *Energies* (Moska i inni, 2023).

W kolejnym etapie prac wykonano badania laboratoryjne na próbkach rdzeniowych pobranych z trzech perspektywicznych dla EGS obszarów na terenie Polski: rejonu Karkonoszy, bloku Gorzowa oraz niecki mogileńsko-łódzkiej. Dokonano charakterystyki parametrów petrofizycznych oraz petrograficznych tych skał. Przedstawiono wyniki testów geomechanicznych przeprowadzonych metodą ultradźwiękową w warunkach złożowych, na zmodyfikowanym do tego celu przez doktoranta stanowisku badawczym. Wskazano także w jaki sposób wskaźnik kruchości skał wykorzystywany dotąd w przemyśle naftowo-gazowniczym może być używany do oceny podatności na hydrauliczne szczelinowanie w tych formacjach. Badania te zostały opublikowane w czasopiśmie *Advances in Geo-Energy Research* (Moska i inni, 2024).

Wykonano także uzupełniające badania termiczne pozyskanych próbek oraz symulacje numeryczne w dwóch obszarach: zmian temperatury formacji i zasięgu chłodzenia podczas długotrwałej eksploatacji energii termalnej oraz reakcji chemicznych zachodzących w trakcie pozyskiwania ciepła. Na tej podstawie dokonano analizy potencjału systemów EGS w zachodniej Polsce. Analiza ta została opublikowana w czasopiśmie *Energies* (Labus i inni, 2025).

Finalnym etapem prac było wykonanie przez doktoranta symulacji numerycznych zabiegów szczelinowania hydraulicznego w oparciu o pozyskane w poprzednich etapach dane i informacje. Na przykładzie dwóch odmiennych litologicznie potencjalnych lokalizacji EGS z obszaru Polski opisano rezultaty analizy wpływu parametrów sprężystości ośrodka skalnego typu HDR na geometrię szczelin w zabiegach HF. Zaprezentowano także analizy wrażliwości geometrii szczeliny oraz jej przewodności na zróżnicowanie modułu Younga oraz współczynnika Poissona w analizowanych formacjach. Wyniki tych prac zostały opublikowane w czasopiśmie *Energies* (Moska i inni, 2025).

Wyniki prac, badań i symulacji przeprowadzonych w całym okresie realizacji pracy pozwalają stwierdzić, że analizowane skały posiadają parametry petrofizyczne, charakterystyczne dla formacji EGS-petrotermalnych. Wpływ modułu Younga oraz współczynnika Poissona na geometrię szczeliny hydraulicznej w analizowanych formacjach można uznać za niewielki, natomiast wpływ na przewodność, może być istotny dla

efektywności systemu geotermalnego w skałach osadowych. Interwały o wyższym module Younga i wyższym wskaźniku kruchości są bardziej perspektywiczne dla systemów EGS w skałach osadowych. W formacjach magmowych bardziej obiecujące wydają się być odcinki o niższym module Younga i wskaźniku kruchości, mogące odzwierciedlać strefy naturalnych nieciągłości lokalnych, które w takich skałach ulegają stymulacji w pierwszej kolejności.

Bibliografia

- Labus K., Moska R., Labus M. Potential Enhanced Geothermal System in Western Poland – Petrothermal and Geochemical Issues. *Energies* Volume 18, 876, 2025. DOI: 10.3390/en18040876
- Moska R., Labus K., Kasza P. Hydraulic Fracturing in Enhanced Geothermal Systems – Field, Tectonic and Rock Mechanics Conditions – A Review. *Energies* Volume 14, 5725, 2021. DOI:10.3390/en14185725
- Moska R., Labus K., Kasza P., Moska A. Geothermal Potential of Hot Dry Rock in South-East Baltic Basin Counties – A Review. *Energies* Volume 16, 1662, 2023. DOI: 10.3390/en16041662
- Moska R., Labus K., Kasza P. Dynamic Elastic Properties, Petrophysical Parameters and Brittleness of Hot Dry Rocks from Prospective Areas of Central Europe. *Advances in Geo-Energy Research* Volume 14, 2, 90-105, 2024. DOI: 10.46690/ager.2024.11.03
- Moska R., Labus K., Kasza P. Impact of Rock Elastic Properties on Fracture Geometry in Potential Enhanced Geothermal Systems in Poland. *Energies* Volume 18, 2869, 2025. DOI: 10.3390/en18112869