

Prof. dr hab. inż. Zenon Pilecki
Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN
ul. Wybickiego 7A
31-261 Kraków

Kraków, 30 listopada 2025

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pana mgra Rafała Moski pt. „Wpływ parametrów sprężystych skał na proces hydraulicznego szczelinowania dla potrzeb wspomaganych systemów geotermalnych (EGS) na terenie Polski”

Rozprawa doktorska została opracowana w Politechnice Śląskiej na Wydziale Górnictwa, Inżynierii Bezpieczeństwa i Automatyki Przemysłowej pod kierunkiem promotora Pana prof. dra hab. Krzysztofa Labusa i opiekuna ze strony Instytutu Nafty i Gazu-Państwowego Instytutu Badawczego Pana dra hab. inż. Piotra Kaszy, profesora instytutu.

1. INFORMACJE WSTĘPNE

Recenzję rozprawy doktorskiej Pana mgra Rafała Moski opracowałem na podstawie pisma Pana prof. dra hab. Krzysztofa Labusa, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynierii Środowiska, Górnictwa i Energetyki Politechniki Śląskiej z dnia 3 października 2025 r., nr RIE-BD.512.38.2025. Przewód doktorski prowadzony jest zgodnie z art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2024, poz. 1571 z późn. zmianami).

Rozprawa doktorska posiada objętość 178 stron. Składa się ona z części ogólnej o objętości 66 stron oraz szczegółowej w postaci 5 artykułów naukowych. Część ogólna pełni charakter syntezy osiągnięcia naukowego szerzej omówionego w załączonych artykułach. Część ogólna składa się z 8 podstawowych rozdziałów. Całość poprzedza lista publikacji z podanym wkładem Autora w każdej z publikacji oraz informacja o użytej terminologii, w tym skrótów i symboli. Streszczenia w języku polskim i angielskim znajdują się na końcu części ogólnej po spisie literatury.

We wstępie, w rozdziale 1 Doktorant zamieścił uzasadnienie podjęcia tematu rozprawy, jej cel naukowo-badawczy oraz zakres pracy. Pozostałe rozdziały zawierają przegląd literaturowy, wyniki i analizę własnych badań laboratoryjnych oraz wyniki i analizę modelowania numerycznego, podsumowanie i wnioski z badań oraz rekomendacje dla

technologii szczelinowania hydraulicznego. Spis literatury części ogólnej rozprawy liczy 66 pozycji. W spisie znajdują się 2 publikacje współautorskie Doktoranta w czasopismach specjalistycznych o zasięgu światowym, inne od publikacji załączonych do rozprawy doktorskiej.

W części szczegółowej znajdują się kopie następujących artykułów naukowych:

- [1] **Rafał Moska**, K. Labus, P. Kasza, Hydraulic Fracturing in Enhanced Geothermal Systems – Field, Tectonic and Rock Mechanics Conditions – A Review. *Energies*, Volume 14, 5725, 2021, DOI:10.3390/en14185725. (IF2021=3.252); 48 cytowań.
- [2] **Rafał Moska**, K. Labus, P. Kasza, A. Moska, Geothermal Potential of Hot Dry Rock in South East Baltic Basin Counties – A Review. *Energies*, Volume 16, 1662, 2023 DOI: 10.3390/en16041662. (IF2023=3.000); 8 cytowań.
- [3] **Rafał Moska**, K. Labus, P. Kasza, 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. (IF2024=9.000); 7 cytowań.
- [4] K. Labus, **Rafał Moska**, M. Labus, Potential Enhanced Geothermal System in Western Poland – Petrothermal and Geochemical Issues. *Energies*, Volume 18, 876, 2025. DOI: 10.3390/en18040876. (IF2025=3,200).
- [5] **Rafał Moska**, K. Labus, P. Kasza, Impact of Rock Elastic Properties on Fracture Geometry in Potential Enhanced Geothermal Systems in Poland. *Energies*, Volume 18, 2869, 2025. DOI: 10.3390/en18112869. (IF2025=3,200).

Czasopisma, w których opublikowano artykuły, są zarejestrowane w bazie Web of Science i posiadają impact factor od 3,0 do 9,0 (*Advances in Geo-Energy Research*). Wszystkie artykuły są współautorskie, przy czym w czterech Doktorant jest głównym Autorem. Udział w opracowaniu artykułów w kolejności ich zestawienia wynosi: 60%, 60%, 80%, 50% i 80%, co daje średnią arytmetyczną 66%. Udział ten polegał, lecz w sposób zróżnicowany, na opracowaniu koncepcji artykułu, wykonaniu przeglądu literaturowego, wykonaniu badań i opracowaniu ich wyników, opracowanie tekstu manuskryptu wraz z grafiką.

Rozprawa doktorska została przygotowana w ramach programu Doktorat Wdrożeniowy edycja V, w wyniku współpracy pomiędzy Politechniką Śląską (PŚ) a Instytutem Nafty i Gazu – Państwowym Instytutem Badawczym (INiG-PIB). Podjęta przez Doktoranta tematyka badawcza ukierunkowana jest na rozwój energetyki geotermalnej w Polsce typu wspomaganych systemów geotermalnych (*Enhanced Geothermal Systems* - EGS). Projekty tego rodzaju rozwijane są w Europie Zachodniej od lat 70 XX wieku, a komercyjne elektrownie wykorzystujące tę technologię funkcjonują obecnie m.in. we Francji i Niemczech. Natomiast w Polsce nadal pozostają w sferze analiz teoretyczno-eksperymentalnych. W zakresie archiwalnych opracowań i publikacji, omówionych przez Doktoranta, do tej pory dokonano głównie oceny możliwości wykorzystania struktur geologicznych występujących na obszarze

Polski do budowy systemów geotermalnych EGS. Natomiast nie podjęto badań mających na celu weryfikację technologicznych możliwości zastosowania EGS w wytypowanych obszarach na terenie Polski. Należy zgodzić się z Doktorantem, że rozprawa jest kolejnym krokiem w kierunku wdrożenia technologii EGS w krajowych, perspektywicznych masywach skalnych.

W odniesieniu do podjętej tematyki i treści rozprawy doktorskiej stwierdzam, że mieści się ona w dziedzinie nauk technicznych, w dyscyplinie Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka.

2. ANALIZA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tytuł rozprawy jest sformułowany jasno i czytelnie. Wydaje się, że korzystniej byłoby użyć sformułowania „parametrów sprężystości” zamiast „parametrów sprężystych”, co też Doktorant konsekwentnie robi w części ogólnej rozprawy. Należy również podkreślić, że tytuły publikacji „bazowych”, wchodzących w skład rozprawy doktorskiej, są umiejętnie sformułowane i wystarczająco informatywne.

Konstrukcja rozprawy doktorskiej bazuje na badaniach szczegółowo przedstawionych w publikacjach. Konstrukcja ta odbiega od standardowych, lecz jest coraz powszechniej stosowana, w związku z szerokim publikowaniem artykułów w czasopismach o zasięgu światowym, recenzowanych przez specjalistów na ogół spoza Polski. Publikacje „bazowe” poprzedza dość obszerne przedstawienie problematyki badań. Pozwala ono na łatwiejsze zapoznanie się z osiągnięciem naukowym Doktoranta. Kolejność zamieszczenia artykułów jest przemyślana pod kątem sposobu przekazania czytelnikowi wiedzy o osiągnięciu naukowym Doktoranta. Niemniej jednak pomocnym byłby dodatkowy rozdział dotyczący metodyki badań, który obejmowałby całość problematyki badań z podkreśleniem i uzasadnieniem kolejnych etapów badań. W dużym stopniu rolę tę pełni podrozdział omawiający zakres badań, który z kolei odwołuje się do szczegółowej metodyki omawianej w załączonych artykułach.

Uzasadnienie wyboru tematyki badawczej oraz cele zostały w sposób wyodrębniony przedstawione we Wstępie w podrozdziałach 1.7 i 1.8.

Głównym celem rozprawy, podkreślonym również w tytule rozprawy, jest określenie wpływu parametrów sprężystości wybranych skał na geometrię szczeliny tworzonej w procesie szczelinowania hydraulicznego (HF), w warunkach ciśnienia i temperatury typowych dla obszarów perspektywicznych dla systemów geotermalnych typu EGS na terenie Polski. Doktorant analizował skały występujące w trzech strukturach geologicznych w Polsce: rejonie Karkonoszy (granit), bloku Gorzowa (ryolit) oraz niecce mogileńsko-tódzkiej (piaskowiec).

Uogólniony zakres rozprawy - Doktorant wyznaczył parametry sprężystości wybranych skał metodą laboratoryjną oraz badał zależność pomiędzy ciśnieniem a parametrami sprężystości. Analizował również zależności pomiędzy dynamicznymi parametrami sprężystości wyznaczonymi metodą laboratoryjną a statycznymi parametrami sprężystości wyznaczonymi w testach wytrzymałościowych. Badania wpływu parametrów sprężystości na

geometrię szczeliny tworzonej w procesie szczelinowania hydraulicznego (HF), Doktorant przeprowadził dla granitu i piaskowca posługując się metodą modelowania numerycznego. Doktorant przeprowadził też uzupełniające badania termiczne próbek skał oraz symulacje numeryczne zmian temperatury skał i zasięgu chłodzenia podczas długotrwałej eksploatacji energii termalnej oraz reakcji chemicznych zachodzących w trakcie pozyskiwania ciepła. Na tej podstawie dokonał analizy potencjału systemów EGS w analizowanych strukturach geologicznych. Doktorant, na podstawie pozyskanych danych z badań, sformułował rekomendacje technologiczne dla zabiegów szczelinowania hydraulicznego.

W bardziej szczegółowej analizie treści rozprawy recenzent odniósł się do wybranych zagadnień badawczych.

Na podstawie przeprowadzonego studium literaturowego Doktorant interesująco uzasadnił jakie parametry geologiczne i petrofizyczne są istotne dla technologii EGS. Przegląd ten pomógł określić cechy zabiegów HF charakterystycznych dla geotermii wspomaganej, geometrię szczelin w kolektorach oraz zakresy parametrów zabiegowych stosowane w realizowanych projektach. Zebrane informacje Doktorant porównał do perspektywicznych dla technologii EGS struktur geologicznych w Polsce. Interesujące jest również porównanie obszarów perspektywicznych w Polsce do obszarów w krajach bałtyckich - Litwy, Łotwy i Estonii.

Badania laboratoryjne parametrów sprężystości Doktorant przeprowadził dla 64 próbek wyciętych z rdzeni dla 3 rodzajów skał: granitów, ryolitów i piaskowców. Doktorant wyznaczył dynamiczne parametry sprężystości na podstawie pomierzonych prędkości fal P i S. Ponadto dla badanych skał wyznaczył parametry porożymetryczne oraz skład mineralny. Wszystkie trzy rodzaje skał charakteryzowały się parametrami petrofizycznymi, na podstawie których Doktorant sklasyfikował skały jako typu petrotermalnego, korzystnego dla technologii EGS. Znacząco niskie i o dużej zmienności prędkości fali P, od ok. 1800 m/s do nie przekraczających 3000 m/s, Doktorant pomierzył dla piaskowca niecki mogileńsko-łódzkiej. Podobnie stosunek prędkości fali P do prędkości fali S był mały i dla wartości minimalnych prędkości przyjmował wartość 1,52 tj. znacząco mniejszą od wartości 1,73. Szerszego wyjaśnienia wymaga również to, że obliczone na podstawie prędkości fal P i S dynamiczne moduły sprężystości są mniejsze od statycznych modułów sprężystości. Natomiast aproksymacja modelem liniowym zależności między tymi modułami ma duży współczynnik determinacji 0,84.

Wyznaczone parametry sprężystości i dodatkowe dane posłużyły do modelowania numerycznego geometrii szczeliny za pomocą oprogramowania FracPro. Doktorant na przykładzie granitu i piaskowca ocenił wpływ parametrów sprężystości na geometrię szczelin w zabiegach HF. Przedstawił istotną w tym przypadku analizę wrażliwości geometrii szczeliny oraz jej przewodności na zróżnicowanie modułu Younga oraz współczynnika Poissona w analizowanych skałach.

Na podstawie wyników badań Doktorant stwierdził, że wpływ modułu Younga oraz współczynnika Poissona na geometrię szczeliny hydraulicznej w analizowanych skałach można uznać za niewielki, natomiast wpływ na przewodność, może być istotny dla efektywności

systemu geotermalnego w piaskowcach. Stwierdził, że interwały o większych wartościach modułu Younga i większej wartości wskaźnika kruchości są bardziej perspektywiczne dla systemów EGS w skałach osadowych. Podkreślił również, że w skałach magmowych bardziej obiecujące są mniejsze wartości modułu Younga i wskaźnika kruchości, które mogą odzwierciedlać korzystne dla tej technologii występowanie strefy nieciągłości.

Najważniejsze wnioski przedstawione w publikacjach zostały zebrane w rozdziale 8 zatytułowanym *Podsumowanie i wnioski* oraz w rozdziale 7 odnośnie rekomendacji technologicznych. Należy podkreślić umiejętne sformułowanie rozdziału 8. Doktorant przedstawił cele, a następnie efekty związane z osiągnięciem tych celów w etapach, które odpowiadały kolejnym publikacjom. Dla każdego z etapów przedstawił najważniejsze wnioski.

W zakresie rekomendacji technologicznych, Doktorant sformułował spostrzeżenia, które mogą być pomocne w projektowaniu szczelinowania hydraulicznego do celów geotermalnych. Wydaje się, że w przypadku piaskowca rekomendacje za bardzo odnoszą się do konkretnych wyników badań uzyskanych przez Doktoranta. Natomiast należy mieć na uwadze, że są to jedne z pierwszych danych, które wymagają jeszcze weryfikacji i badań skał z innych otworów. Niemniej jednak sformułowane spostrzeżenia umiejętnie łączą wiedzę z szeroko rozumianych doświadczeń w zakresie stosowania technologii EGS z wynikami badań uzyskanymi przez Doktoranta.

Należy podkreślić, że rozprawa doktorska została bardzo dobrze opracowana ze strony edycyjnej. Recenzent zauważył jedynie niewielką liczbę nieścisłości edycyjno-językowych w tekście rozprawy:

- Doktorant często używa wyrazów wyższy/niższy w kontekście, gdzie niejednokrotnie poprawniej jest użyć wyrazów większy/mniejszy np. mniejsza wartość modułu zamiast niższa wartość modułu itp.;
- Należy również zaznaczyć, że należy unikać używania formy bezosobowej w opisie osiągnięcia naukowego, gdyż utrudnia to ocenę udziału w badaniach;
- Występuje jedynie kilka nieścisłości typu „literówek”, co świadczy o dużej staranności w weryfikacji tekstu.

W efekcie zapoznania się z osiągnięciem naukowym Doktoranta nasunęły się recenzentowi następujące pytania, na które proszę o odpowiedź w trakcie obrony rozprawy doktorskiej:

1. Jak uzasadnić to, że statyczne moduły Younga były większe od dynamicznych dla piaskowca. Czy można prosić o odniesienie się do mechanizmu propagacji fal P i S w badanym piaskowcu.
2. Proszę o przybliżenie celu porównania statycznych i dynamicznych parametrów sprężystości w kontekście realizacji głównego celu badań.
3. Jak jest opinia Doktoranta - czy w zakresie dalszych badań należałoby analizować parametry wytrzymałościowe skał (wytrzymałość jednoosiową R_c , spójność, kąt tarcia

wewnętrznego), które mogą mieć wpływ na warunki inicjacji i propagacji szczelin (mechanizm zniszczenia ośrodka) w trakcie zabiegu szczelinowania hydraulicznego.

3. OCENA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Pan mgr Rafał Moska przedstawił oryginalne rozwiązanie problemu naukowego polegające na ocenie wpływu parametrów sprężystości skał na proces hydraulicznego szczelinowania dla potrzeb wspomaganych systemów geotermalnych dla wytypowanych obszarów perspektywicznych na terenie Polski. Badał on skały występujące w trzech strukturach geologicznych w Polsce: granit (rejon Karkonoszy), ryolit (blok Gorzowa) oraz piaskowiec (niecka mogileńsko-łódzka). Dla osiągnięcia celu badań dokonał charakterystyki parametrów petrofizycznych oraz petrograficznych tych skał. Wykonał testy geomechaniczne dla symulowanych warunków złożowych, na zmodyfikowanym do tego celu stanowisku badawczym. Przedstawił nową interpretację wskaźnika kruchości skał do oceny podatności na hydrauliczne szczelinowanie. Przeprowadził symulacje numeryczne wpływu parametrów sprężystości na geometrię szczeliny tworzonej w procesie szczelinowania hydraulicznego dla granitu i piaskowca. Wykonał też badania termiczne skał oraz symulacje numeryczne zmian temperatury skał i zasięgu chłodzenia podczas długotrwałej eksploatacji energii geotermalnej oraz reakcji chemicznych zachodzących w trakcie pozyskiwania ciepła.

Uzyskane wyniki pozwoliły na sformułowanie wniosków przydatnych do oceny potencjału systemów EGS na perspektywicznych obszarach w Polsce. Osiągnięcie naukowe Doktoranta ma znaczenie praktyczne i pozwoliło na sformułowanie rekomendacji technologicznych. Należy jednak podkreślić, że podjęty problem naukowy wymaga dalszych badań w zróżnicowanych warunkach geologicznych.

Osiągnięcie naukowe zostało szczegółowo przedstawione w pięciu wieloautorskich artykułach indeksowanych w bazie Web of Science. Średni udział procentowy Doktoranta w opracowaniu tych artykułów jest wyraźnie największy i wynosi 66%. Ma on również znaczący charakter merytoryczny wynikający z deklaracji zamieszczonej w artykułach. Wszystkie załączone artykuły zawierają oryginalną wiedzę przeglądową lub wyniki badań eksperymentalnych.

Pan mgr Rafał Moska wykazał się dobrą znajomością ogólnej wiedzy teoretycznej w dyscyplinie nauki o Inżynierii Środowiska, Górnictwa i Energetyki. Rozprawę doktorską cechują umiejętnie wyjaśnione procedury metodyczne i uzyskane wyniki badań. Wskazuje to na dużą wiedzę Doktoranta w tym zakresie. Należy podkreślić umiejętne użycie terminologii problematyki badawczej w języku angielskim w załączonych artykułach.

Pan mgr Rafał Moska wykazał się wystarczającymi umiejętnościami do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej o czym świadczą jasno i czytelnie przedstawione wyniki badań w załączonych artykułach. Konstrukcja rozprawy jest logiczna i jasna. Nieliczne, zauważone

nieściśności mają w głównej mierze charakter edycyjno-językowy i nie obniżają wartości merytorycznej rozprawy doktorskiej.

Reasumując, przedłożona mi do recenzji rozprawa doktorska Pana mgra Rafała Moski zawiera oryginalne osiągnięcie naukowe. Doktorant wykazała się ogólną wiedzą teoretyczną w zakresie swojej dyscypliny naukowej oraz dużą umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

4. WNIOSEK KOŃCOWY

Na podstawie przedstawionej mi do recenzji rozprawy doktorskiej **Pana mgra Rafała Moski pt. „Wpływ parametrów sprężystych skał na proces hydraulicznego szczelinowania dla potrzeb wspomaganych systemów geotermalnych (EGS) na terenie Polski”** stwierdzam, że spełnia ona wymagania Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. W związku z tym, wnioskuję do Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynierii Środowiska, Górnictwa i Energetyki Politechniki Śląskiej o dopuszczenie Doktoranta do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Podpisał Zenon Pilecki