

## **RECENZJA**

**rozprawy doktorskiej mgr. inż. Macieja Miecznika**

p.t.

***Model zrównoważonej eksploatacji wód geotermalnych w centralnej części Podhala  
do produkcji energii cieplnej i elektrycznej***

Podstawą sporządzenia niniejszej recenzji jest pismo-zlecenie o numerze AO-520-8/15 z dnia 19. października 2016 r., wystawione przez Dyrektora Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Pana prof. dr. hab. inż. Eugeniusza Mokrzyckiego, wynikające z uchwały Rady Naukowej tegoż Instytutu, oznaczonej nr 5/III/2016.

### **1. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA TEMATU ROZPRAWY**

Przedstawiona do recenzji praca doktorska mgr. inż. Macieja Miecznika powstała pod kierunkiem Pani dr hab. inż. Beaty Kępińskiej, profesor nadzwyczajnej IGSMiE PAN w Krakowie, pełniącej w przewodzie doktorskim obowiązki promotora.

Praca liczy łącznie 233 numerowane strony, w tym 34 strony załączników i składa się z 10 rozdziałów uzupełnionych spisem treści (s. 3-6); wykazem ważniejszych oznaczeń (s. 7-12); wstępem (s. 13-17); zdefiniowaniem celu, zakresu i tez pracy (s. 18-21); wykazem literatury (s. 184-193); spisem rysunków (s. 194-198) oraz spisem tabel (s. 199). Integralną częścią pracy i zarazem jej uzupełnieniem jest zbiór załączników (s. 200-233) zawierających niektóre reprezentatywne wyniki obliczeń, przykładowe procedury obliczeniowe oraz wybrane wskaźniki i parametry. W zasadniczej części pracy zamieszczono 75 rysunków i wykresów, 14 tabel i 127 numerowanych zależności (wzorów). Dodatkowe 38 rysunków i wykresów, 13 tabel oraz 10 zależności zawarte jest w załącznikach. Uzupełnieniem pracy jest jej streszczenie w j. polskim (s. 224) i j. angielskim (s. 229). *Spis literatury* obejmuje 120 opublikowanych pozycji reprezentatywnych dla tematu dysertacji, w tym 60 publikacji w j. angielskim. Uzupełnieniem jest dodatkowe 16 pozycji materiałów niepublikowanych, będących raportami z realizacji prac badawczych. Podział strukturalny pracy na rozdziały jest poprawny i nie budzi zastrzeżeń.

Problematyka recenzowanej rozprawy doktorskiej dotyczy ważnego ze względów technicznych i energetycznych, także eksploatacyjnych, zagadnienia wykorzystania energii geotermalnej do wytwarzania ciepła i energii elektrycznej, i została odniesiona do zasobów wód geotermalnych rejonu Podhala.

Polska posiada znaczne zasoby wód termalnych charakteryzujących się niską i średnią wartością entalpii. Są one wykorzystywane przede wszystkim do celów ciepłowniczych (scentralizowane systemy grzejne) i w rekreacji (baseny termalne). Ze względu na specyfikę pracy systemów grzewczych w Polsce, średnioroczny współczynnik wykorzystania ciepła zawartego w wodzie termalnej, definiowany jako współczynnik efektywności wykorzystania mocy zainstalowanej, charakteryzuje się niewielką wartością rzędu 0,25-0,30. Oznacza to, że ciepło zawarte w pozyskiwanych wodach geotermalnych jest wykorzystywane zaledwie w 25 - 30% jego potencjalnych zasobów (to jest możliwych do wykorzystania), co z kolei przekłada się na niską efektywność energetyczną, także ekonomiczną, pracy instalacji. Tym samym podjęcie działań w kierunku poprawy stopnia wykorzystania mocy cieplnej ujęć geotermalnych ma istotne znaczenie, albowiem poza efektem energetycznym powinno przyczynić się do szybszej amortyzacji kosztów inwestycji, a w szczególności kosztu wykonania odwiertów stanowiących wyjątkowo kapitałochłonny element.

Jednym ze sposobów rozwiązania tego problemu, stanowiącym przedmiot badań i analiz zawartych w recenzowanej dysertacji, jest wykorzystanie części strumienia wody geotermalnej (nadwyżek energii geotermalnej) do wytwarzania energii elektrycznej w niskotemperaturowej elektrowni pracującej wg tzw. organicznego obiegu Rankine'a (ORC), działającej w układzie priorytetowej funkcji dostarczania ciepła grzejnego do odbiorców.

Problem jest istotny ze względu na optymalizację wykorzystania energii geotermalnej, a zarazem skomplikowany z powodu funkcjonalnego nakładania się na siebie pracy dwóch różnych, całkowicie odmiennych i niekompatybilnych układów, to jest złoża geotermalnego (struktury geologicznej) i instalacji energetycznej elektrowni / elektrociepłowni ORC.

Istotne znaczenie ma tutaj poznanie procesów geofizycznych sterujące przepływem wód w złożu geotermalnym. Tymczasem brak jest nie tylko ogólnego modelu funkcjonowania złoża, ale także powszechnie przyjętego mechanizmu transportu ciepła, co wynika ze złożoności i niepowtarzalności procesu, na którego przebieg wpływa szereg czynników. W transporcie masy i energii (ciepła) w strukturach złożowych, ważne jest nie tylko uzyskanie dużych wartości przepływu geopływu, ale także jego stabilność w długim przedziale czasu, zarówno ze względu na wydajność, jak i parametry termiczne geopływu. Dlatego dokładne poznanie mechanizmów towarzyszących temu zjawisku jest niezbędne do optymalizacji konstrukcji i pracy urządzeń, w których wykorzystywane jest ciepło wód termalnych. Jest to istotne zarówno w przypadku geotermalnych systemów ciepłowniczych, jak i przede wszystkim w elektrowniach bazujących na wodach termalnych.

Jak już zaznaczyłem, zagadnienie jest złożone, a jego analiza kłopotliwa i trudna. Jednocześnie należy podkreślić, że podjęcie badań w tym temacie jest ważne nie tylko ze względu na znaczenie poznawcze, ale i odniesienia utylitarne.

Stąd też wynika moja pozytywna ocena zarówno tematu, jak i zakresu badań podjętych przez Doktoranta.

## **2. OCENA MERYTORYCZNA PRACY**

W przedstawionej do oceny dysertacji można wyróżnić dwie zasadnicze jej części, poprzedzone dwoma nienumerowanymi rozdziałami, z których pierwszy stanowi *Wstęp*, zaś drugi precyzuje *Cel zakres i tezy pracy doktorskiej*. Z racji ich obszerności, części

te omawiam poniżej w sposób syntetyczny, formułując oceny cząstkowe składające się na finalną ocenę merytoryczną rozprawy.

## 2.1. Treść rozprawy

Rozdział *Wstęp* (s. 13-16) stanowi rzeczowe wprowadzenie w tematykę dysertacji, w którym Doktorant szczegółowo omawia uwarunkowania jakie legły u podstaw wyboru przedmiotu, celu i zakresu pracy. W oparciu o wnikliwą i rzetelną analizę stanu wiedzy zawartej w dostępnych materiałach źródłowych, Doktorant scharakteryzował zasoby geotermalne Polski, odnosząc się do potencjalnych możliwości ich wykorzystania, w tym do wytwarzania energii elektrycznej. Szczególną uwagę zwrócił na obszar Podhala, charakteryzujący się wyjątkowo korzystnymi parametrami pozyskiwanej wody geotermalnej, zarówno co do zasobów ilościowych (strumień wody), jak i cieplno-fizycznych (parametry termiczne). Stanowi to uzasadnienie wyboru przez Doktoranta tego rejonu do realizacji prac badawczo-analitycznych ujętych tematem dysertacji.

Mając na względzie konieczność realizacji zasady tzw. zrównoważonej eksploatacji zasobów wód geotermalnych w centralnej części Podhala, została sprecyzowana przez Doktoranta potrzeba wykonania i powiązania ze sobą dwóch odrębnych modeli matematycznych, to jest numerycznego modelu podhalańskiego systemu geotermalnego (p.s.g.) pozwalającego prowadzić symulacje prognostycznych zachowania eksploatowanego złoża oraz matematycznego modelu geotermalnej elektrowni ORC, umożliwiającego wieloaspektową analizę jej pracy.

W kontekście prowadzonych rozważań oraz postawionego celu badawczego i aplikacyjnego, Doktorant sformułował następujące tezy rozprawy doktorskiej (s. 18-21):

1. *Podhalański system geotermalny (p.s.g.) posiada znaczną pojemność cieplną oraz odpowiednie wgłębne warunki termiczne i złożowe, które pozwalają na jego zrównoważoną eksploatację. Biorąc pod uwagę definicję zrównoważonej eksploatacji, obniżenie temperatury złożowej wód geotermalnych w formacji eocenu środkowego i triasu środkowego w okresie 100 lat eksploatacji powinno pozwolić na pozyskiwanie energii cieplnej z mocą nie mniejszą niż 90% nominalnej mocy cieplnej ujęcia.*

2. *Wody geotermalne o temperaturach poniżej 90°C mogą służyć do wytwarzania energii elektrycznej i cieplnej, nie wpływając negatywnie na stabilną i zrównoważoną eksploatację złoża.*

3. *Produkcja energii elektrycznej w geotermalnej elektrowni ORC w okresie nadpodaży energii cieplnej wytwarzanej przez PEC Geotermia Podhalańska S.A. może być opłacalna ekonomicznie.*

Wynika z nich, że zasadniczym celem pracy Doktoranta było rozpoznanie i opisanie zjawisk towarzyszących eksploatacji złoża geotermalnego (pozyskiwania wody / energii geotermalnej), a w szczególności ustalenie wpływu warunków eksploatacji na obniżenie mocy cieplnej w określonym przedziale czasu, co powinno dać odpowiedź, czy w przypadku budowy elektrowni geotermalnej nie zostanie odnotowany negatywny jej wpływ na stabilną eksploatację złoża. Potwierdzenie ww. tez wiązało się z potrzebą prowadzenia odpowiednich prac analityczno-badawczych mających na celu optymalizację wykorzystania zasobów geotermalnych, a tym samym wymagało wykonania komplementarnej funkcjonalnej analizy

reakcji zbiornika wód geotermalnych w warunkach zwiększonego poboru ciepła, odniesionej do symulacji niestacjonarnych warunków transportu masy i energii, jak również uwzględniającej zmienność dostępnej mocy cieplnej dla potrzeb wytwarzania energii elektrycznej w elektrowni ORC, uzależnionej od zapotrzebowania na ciepło grzejne przez jego odbiorców.

Reasumując uważam, że zarówno cel, jak i tezy pracy zostały przez Doktoranta sformułowane poprawnie.

W strukturze pracy doktorskiej mgr. inż. Macieja Miecznika można wyodrębnić dwie zasadnicze części tematyczne.

Część pierwsza dotyczy mechanizmu funkcjonowania złoża geotermalnego ze szczególnym uwzględnieniem modelowania numerycznego eksploatacji podhalańskiego zbiornika geotermalnego i wynika z potrzeby dogłębnego zbadania prawdopodobnej jego „reakcji” na zwiększoną eksploatację wód termalnych w ciągu określonego przedziału czasu. Wynika stąd zakres tematyczny kompleksowej analizy warunków geotermalnych w regionie Obszaru Górniczego Podhale-1, uwzględniającej:

- wpływ całodobowej eksploatacji przy maksymalnie dostępnym strumieniu wody na spadek ciśnienia w otworach produkcyjnych oraz na poziom zwierciadła hydraulicznego w warstwie wodonośnej;
- wpływ wartości temperatury i strumienia wody zatłaczanej do otworów chłonnych na tempo propagacji frontu chłodnego;
- wpływ temperatury zatłaczanej wody na wzrost ciśnienia zatłaczania.

Odpowiedzi na te zagadnienia stanowiły podstawę przeprowadzenia analizy koncepcji budowy i eksploatacji niskotemperaturowej elektrowni geotermalnej ORC i wymagały opracowania modelu numerycznego zbiornika wód geotermalnych w analizowanym obszarze geologicznym.

Szczegółowe omówienie tej problematyki stanowi treść pierwszej części dysertacji i jest zawarte w trzech kolejnych numerowanych rozdziałach.

W rozdziale 1 (s. 22-39) Doktorant zamieścił charakterystykę podhalańskiego systemu geotermalnego (p.s.g.), przy czym definicja ta obejmuje podfliszowe poziomy wodonośne niecki podhalańskiej, w których wody termalne zalegają w porowo-szczelinowych strukturach węglanowych z okresu eocenu środkowego i triasu środkowego. Na podstawie wnikliwej kwerendy literatury Autor zawarł obszerną analizę geologiczną, hydrologiczną i termiczną systemu, odniesioną do jego geo-strukturalnej i fizyko-geograficznej lokalizacji, popartą ogólną charakterystyką geologiczną i litostratygraficzną budowy niecki podhalańskiej i jej podłoża w obszarze objętym badaniami. Wynikająca z budowy tektonicznej struktura niecki, na którą wpłynęły ruchy orogeniczne przekładające się na układ uskoków i spękań powstałych w wyniku formowania górotworu, ma istotny wpływ na sposób krążenia wody i lokalne kierunki jej przepływu oraz znaczenie dla eksploatacji złóż wód termalnych.

Wnikliwa i dogłębna analiza literatury umożliwiła Doktorantowi przeprowadzenie oceny warunków hydrologicznych i geotermicznych p.s.g. w obszarze objętym badaniami (pracą doktorską) wraz z oceną głównych parametrów zbiornikowych (miąższość,

porowatość, przepuszczalność, przewodność), warunków zasilania, przepływu wód, ich chemizmu, a także warunków termicznych. Rozdział zamyka omówienie wcześniejszego i obecnego praktycznego wykorzystania wód termalnych na tym terenie.

W rozdziale 2 rozprawy (s. 40-43) Doktorant sprecyzował model koncepcyjny obszaru geotermalnego objętego badaniami, charakteryzując w sposób jakościowy rozmieszczenie oraz przybliżoną geometrię wszystkich istotnych elementów składających się na geologiczno-tektoniczny opis złoża i zachodzących w nim procesów transportu masy i energii, a także przemian chemicznych. Model jest wynikiem syntezy dostępnych informacji zebranych na podstawie dotychczasowych badań geologicznych i otworowych, odniesionych do głównego zbiornika wód termalnych p.s.g., to jest do jednostki Białego Dunajca, tworzonej przez skały węglanowe triasu (dolomity i wapienie) i nadległe warstwy środkowo-eoceńskie (wapienie i zlepieńce).

W rozdziale 3 (s. 43-86) Doktorant przedstawił model numeryczny obszaru badań, opracowany na podstawie ww. modelu koncepcyjnego, przy czym w części początkowej (p. 3.1), na bazie wnikliwej kwerendy, zamieścił syntetyczne omówienie i analizę dotychczas wykonanych modeli podhalańskiego systemu geotermalnego, poczynając od pierwszych uproszczonych opracowań z lat 80. ub. wieku, poprzez modele sporządzone w latach 90. w ramach programu UNU-GTP, aż po modelowanie p.s.g. wykonane w ostatnim okresie. Ten dość obszerny przegląd materiału dowodzi dobrego rozeznania Doktoranta w aktualnym stanie wiedzy i w prowadzonych pracach dotyczących tej niewątpliwie trudnej tematyki będącej przedmiotem rozprawy doktorskiej.

Na potrzeby dysertacji Doktorant wykorzystał i zmodyfikował jeden z wcześniejszych numerycznych modeli obliczeniowych, sporządzony przez zespół pracowników IGSMiE PAN oraz PIG, a dotyczący fragmentu p.s.g. którego centralną część stanowił OG Podhale-1. Model został wykonany w programie TOUGH\_v.2, stanowiącym standard modelowania numerycznego transportu masy i energii, związanych z pozyskiwaniem energii geotermalnej z górotworu. Program wykorzystuje metodę całkownych różnic skończonych w celu dyskretyzacji przestrzennej oraz czasowej. Układ liniowych równań różniczkowych jest rozwiązywany za pomocą metod bezpośrednich lub zbioru metod iteracyjnych, przy czym pierwszy sposób wymaga dużych zasobów pamięci i długiego czasu obliczeniowego, zaś drugi - charakteryzuje się większą wydajnością obliczeniową, ale mniejszą dokładnością.

Model ten został zmodyfikowany przez Doktoranta i dostosowany do potrzeb pracy poprzez zmniejszenie jego rozmiaru przestrzennego oraz zwiększenie liczby elementów obliczeniowych, przy czym w pracy zawarto szczegółowy opis modelu wraz z przyjętymi warunkami brzegowymi i z podaniem kodu obliczeniowego.

Należy podkreślić, że pomimo wykorzystania symulatora TOUGH\_v.2, opracowany model numeryczny charakteryzuje się nowym podejściem, a istotnym osiągnięciem Doktoranta, na który położył on szczególny nacisk jest kalibracja modelu stanowiąca najtrudniejszy i najbardziej pracochłonny etap pracy, w której wykorzystano dane pomiarowe uzyskane w ciągu 20 lat monitoringu otworów geotermalnych, prowadzonego w warunkach rzeczywistej eksploatacji.

Druga część dysertacji obejmuje problematykę wykorzystania energii geotermalnej ze szczególnym uwzględnieniem wytwarzania energii elektrycznej i omawia zagadnienie

optymalizacji energetycznej potencjalnej niskotemperaturowej elektrowni geotermalnej ORC zasilanej z OG Podhale-1.

Wytwarzanie energii elektrycznej i ciepła z energii zawartej w pozyskanej ze złoża gorącej wodzie geotermalnej wymaga wykonania obliczeń prowadzących do osiągnięcia analizowanych funkcji celu, którymi w rozpatrywanym projekcie są: maksymalizacja: mocy elektrycznej (brutto) i rocznej produkcji energii elektrycznej (brutto i netto) oraz maksymalizacja wartości bieżącej netto projektu. Rozpatrywanym w pracy modelem elektrowni jest układ pracujący wg tzw. organicznego obiegu Rankine'a (ORC), stosowany w celu wykorzystania niskotemperaturowych źródeł ciepła. Opracowany przez Doktoranta matematyczny model elektrowni ORC, poza oszacowaniem jej mocy brutto i netto oraz wielkości zużycia energii na potrzeby własne, umożliwia symulację dynamicznych warunków pracy, tj. wpływu zmiennego w ciągu roku zapotrzebowania na ciepło grzejne i zmiennych warunków hydro-meteo wpływających na strumień cieczy chłodzącej skraplacz. Ponadto umożliwia uwzględnienie wpływu: stosowanego czynnika roboczego na moc brutto i netto elektrowni; temperatury dolnego źródła na sprawność cieplną oraz wybranego czynnika roboczego na temperaturę powrotu cieczy geotermalnej i możliwość jej dalszego wykorzystania dla celów ciepłowniczych.

Szczegółowe omówienie tej problematyki jest zawarte w pięciu kolejnych rozdziałach, przy czym w rozdziale 4 (s. 89-92) Doktorant zawarł podstawowe informacje odnośnie pochodzenia i przestrzennego zróżnicowania zasobów geotermalnych w litosferze ziemskiej oraz scharakteryzował w sposób ilościowy i jakościowy wykorzystanie wód termalnych do wytwarzania energii elektrycznej (z uwzględnieniem stosowanych rozwiązań), a także omówił wykorzystanie ciepła geotermalnego do celów grzewczych.

Kontynuację tej tematyki stanowi rozdział 5 (s. 93-101), w którym Doktorant na podstawie analizy stanu wiedzy na temat omawianych procesów, przeprowadzonej na podstawie dostępnej literatury, zamieścił wprowadzenie w problematykę wytwarzania energii elektrycznej i ciepła w systemach geotermalnych współpracujących z elektrownią typu ORC. Rozdział zawiera najważniejsze informacje na temat podstaw działania organicznego obiegu Rankine'a, z uwzględnieniem różnych jego konfiguracji i parametrów pracy, stosowanych czynników roboczych, a także z odniesieniem się do sprawności cieplnej obiegu i wpływu sposobu odbioru ciepła (chłodzenie skraplacza) na efektywność energetyczną obiegu. Uzupełnieniem jest omówienie problematyki wytwarzania energii elektrycznej i ciepła w elektrowniach / elektrociepłowniach typu ORC.

Ważnym fragmentem pracy doktorskiej jest rozdział 6 (s. 102-142), w którym Doktorant zawarł opracowany przez siebie model matematyczny geotermalnej elektrowni ORC współpracującej z OG Podhale-1, przy czym w kolejnych podrozdziałach została omówiona procedura wieloetapowego budowania modelu. W podrozdziale 6.1 zamieszczono charakterystykę istniejącej technicznej infrastruktury energetycznej, którą tworzy PEC Geotermia Podhalańska, uzupełnioną charakterystyką energetyczną odbiorcy ciepła precyzującą zapotrzebowanie na moc grzewczą (podrozdział 6.2), w tym określenie zdolności produkcyjnych otworów geotermalnych oraz czasowej zmienności strumienia wód, możliwego do wykorzystania w potencjalnej elektrowni ORC. Z kolei w podrozdziale 6.3 omówiono możliwe do zastosowania systemy odbioru ciepła wraz z ich charakterystyką, co pozwala wyznaczyć temperatury kondensacji par czynnika roboczego w skraplaczu

elektrowni. Natomiast w podrozdziale 6.4 omówiono kryteria doboru czynników roboczych stosowanych w obiegu ORC. W ostatnim podrozdziale (6.5) zamieszczono i szczegółowo omówiono model matematyczny potencjalnej elektrowni ORC opracowany dla warunków zasilania z OG Podhale-1, przy czym w kolejnych punktach Doktorant podał metodykę wyznaczania parametrów stanu czynnika roboczego (p. 6.5.1); omówił wymianę ciepła w wymiennikach elektrowni (p. 6.5.2); scharakteryzował pobór mocy na potrzeby własne (p. 6.5.3) oraz omówił optymalizację warunków pracy wg przyjętej funkcji celu, to jest maksymalizacji produkcji energii elektrycznej brutto (p. 6.5.4).

W rozdziale 7 pracy zawarta jest ocena ekonomiczna i ekologiczna proponowanych rozwiązań, przy czym analiza ekonomiczna została wykonana dla wariantu elektrowni ORC charakteryzującej się potencjalnie najniższymi nakładami inwestycyjnymi i największym prawdopodobieństwem zysku, czyli instalacji, w której odbiór ciepła kondensacji czynnika roboczego odbywa się za pomocą wody pobieranej z rzeki. W analizie Doktorant wykorzystał metodę zdyskontowanych przepływów pieniężnych, zaś optymalizację ekonomiczną modelu elektrowni przeprowadzono wg kryterium wartości bieżącej netto (NPV).

Natomiast ocena oddziaływania ekologicznego została przeprowadzona w oparciu o tzw. emisję unikniętą (wynikającą z zaniechania spalania paliwa) oraz na podstawie oceny przyrostu temperatury wody w rzece Biały Dunajec, spowodowanego zrzutem podgrzanej wody opuszczającej skraplacz, pobieranej do procesu chłodzenia z rzeki.

Rozdział 8 zawiera symulacje prognozowanych warunków eksploatacji, obejmujące wyniki przedstawiające zmiany temperatury i zmiany ciśnienia złożowego w otworach wydobywczych w okresie dotychczasowej eksploatacji i eksploatacji założonej dla przypadku generacji prądu elektrycznego. Na podstawie prowadzonych analiz Doktorant wykazał, że zwiększenie wydobycia wody geotermalnej, co jest związane z pracą potencjalnej elektrowni ORC, nie spowoduje znaczących zmian parametrów złożowych w analizowanym przedziale czasu. Przykładowo, dla otworu Bańska IG-1 spadek ciśnienia złożowego będzie nieznaczny, a dojście tzw. frontu chłodnego w przypadku, gdzie przewidywany spadek temperatury wody w zbiorniku jest szacowany na około 4,4 °C, powinno nastąpić po okresie 100 lat, przy czym pierwsze symptomy powinny mieć miejsce po około 40-50 latach.

Oszacowanie temperatury złożowej w sąsiedztwie otworów produkcyjnych po okresie 100 lat wzmożonej eksploatacji pozwala na weryfikację prawdziwości pierwszej z trzech tez postawionych na potrzeby dysertacji.

Ostatnimi rozdziałami dysertacji są: Rozdział 9 (s. 177-180) zawierający obszerne podsumowanie pracy oraz Rozdział 10 (s. 181-183) zawierający wnioski wynikające z pracy.

## **2.2. Ocena merytoryczna pracy**

Przedstawiona do oceny dysertacja stanowi interesującą pracę badawczą o dobrym poziomie merytorycznym i znaczeniu użytkowym, dotyczącą optymalizacji wykorzystania zasobów geotermalnych z obszaru koncesyjnego PEC Geotermia Podhalańska S.A.

Zasadniczym jej celem była ocena możliwości zwiększenia stopnia wykorzystania potencjału energetycznego pozyskiwanej wody geotermalnej, jako efektu przeznaczenia części zawartej w niej energii (ciepła) do wytwarzania energii elektrycznej w geotermalnej elektrowni ORC. Wiąże się to ze zwiększeniem wydobycia i koniecznością zatłoczenia do

złoża dodatkowego strumienia schłodzonej wody, co mogłoby spowodować przedwczesne dotarcie tzw. frontu chłodnego do otworów wydobywczych i tym samym spadek temperatury wody w otworze produkcyjnym. Z kolei zwiększone wydobycie wód geotermalnych mogłoby przyczynić się do obniżenia ciśnienia złożowego, w rezultacie czego zmianie uległoby pole hydrodynamiczne zbiornika geotermalnego.

Autor rozprawy podjął się trudnego zadania przeprowadzenia analizy tego problemu, to jest oceny wpływu zwiększonej eksploatacji wód geotermalnych na stabilność warunków złożowych oraz oszacowania wielkości możliwej produkcji energii elektrycznej w elektrowni ORC. Wymagało to komplementarnej analizy obu procesów, ponieważ są one funkcjonalnie zależne od siebie.

W celu realizacji postawionego celu badawczego, w odniesieniu do zjawisk zachodzących w górotworze Doktorant zastosował procedury modelowania niestacjonarnych procesów wymiany masy i energii, wykorzystując do tego celu symulator złożowy 3D TOUGH\_v.2, przy czym kluczowym elementem budowy modelu numerycznego dla analizowanego systemu geotermalnego była jego kalibracja, a nowością - oszacowanie depresji związanej z wydobyciem wód w oparciu o wartość zredukowanego ciśnienia głowicowego, co pozwoliło osiągnąć bardzo wysoką jakość kalibracji hydrodynamicznej i termicznej modelu. Jednocześnie kalibracja modelu numerycznego złoża pozwoliła na pogłębienie dotychczasowej wiedzy o podhalańskim systemie geotermalnym, spełniając tym samym badawczy cel pracy.

Druga część pracy objęła opracowanie rozbudowanego modelu elektrowni geotermalnej ORC, który został wykonany przez Doktoranta w programie MS Excel, z wykorzystaniem narzędzi zewnętrznych w postaci pakietu optymalizacyjnego Solver i bazy czynników CoolProp, przy czym nowością było prowadzenie obliczeń optymalizacyjnych w warunkach niestacjonarnych, co wynikało z dużych wahań dostępności strumienia wód geotermalnych kierowanych do elektrowni i zmiennych warunków chłodzenia skraplacza (warunki hydro-meteo) determinujących ilość energii elektrycznej netto możliwej do pozyskania z układu.

W mojej ocenie Doktorant w sposób prawidłowy i nowatorski zrealizował postawione przed nim zadanie, a proponowany przez niego model współwytwarzania ciepła i energii elektrycznej z wód geotermalnych pozyskiwanych w OG Podhale-1 wskazuje na możliwość zwiększenia stopnia pozyskania energii z podhalańskiego systemu geotermalnego, przy zachowaniu zrównoważonej gospodarki jego zasobami. Zagadnienie to stanowiło cel aplikacyjny badań, który w mojej opinii został przez Doktoranta zrealizowany. Natomiast opracowane przez Niego modele obliczeniowe należy zaliczyć do Jego ważnych osiągnięć.

Tym samym odnosząc się do uzyskanych i przedstawionych w pracy szczegółowych wyników badań i obliczeń można stwierdzić, że:

- W zakresie postawionego celu badawczego Doktorant dokonał pogłębionego rozpoznania warunków termicznych i zbiornikowych OG Podhale-1, czego efektem są opracowane mapy (symulowanego):
  - rozkładu temperatury górotworu na wybranych głębokościach,
  - rozkładu temperatury w stropie głównego poziomu wód geotermalnych;



- rozkładu ciśnienia złożowego, pola hydrodynamicznego oraz histogram prędkości przepływu w głównym poziomie zbiornikowym modelowanego obszaru;
- zasięgu wychłodzenia górotworu związanego z dotychczasową eksploatacją.
- Natomiast w odniesieniu do sformułowanych w rozprawie doktorskiej trzech tez można stwierdzić, że:
  - zwiększony w stosunku do obecnego poboru poziom eksploatacji wód geotermalnych do celów energetycznych wiązałby się z niewielkim spadkiem mocy nominalnej ujęć, i w symulowanym okresie 100 lat wyniósł 2,2%, co stanowi udowodnienie tezy nr 1;
  - w pracy wykazano, że wody geotermalne o temperaturze poniżej 90°C mogą służyć do wytwarzania energii elektrycznej oraz ciepła nie wpływając negatywnie na stabilną i zrównoważoną eksploatację złoża, co stanowi udowodnienie tezy nr 2;
  - wykazano również, iż produkcja energii elektrycznej w planowanej elektrowni ORC w okresie nadpodaży ciepła, może być opłacalna ekonomicznie, o czym świadczy dodatnia wartość NPV, uzyskana przy przyjętych założeniach, i co pozwala udowodnić tezę nr 3.

Reasumując pragnę jednoznacznie stwierdzić, że Doktorant tym samym zrealizował zamierzony cel pracy i udowodnił postawione w niej tezy. Natomiast sama praca jest udanym eksperymentem badawczym, a problem w niej wyselekcjonowany ma duże znaczenie poznawcze, a także użyteczne.

### 2.3. Uwagi merytoryczne

Wnikliwa lektura pracy nasunęła mi się następujące uwagi, których wyjaśnienie przez Doktoranta byłoby wskazane, a mianowicie:

- Na stronie 48<sup>12</sup> (także inne) podano: „... założono zatłaczanie 400 m<sup>3</sup>/h wód o temperaturze 30°C otworem Biały Dunajec PGP-2 i zrzut do cieku powierzchniowego wody w ilości 200 m<sup>3</sup>/h.” → komentarz 1: czy realne jest obniżenie temperatury zatłaczanej wody geotermalnej do podanej wartości? W żadnej z polskich ciepłowni geotermalnych nie uzyskuje się takiej temperatury zatłaczania.

→ komentarz 2: czy celowe, z punktu widzenia odnawialności złoża, jest zrzucanie wody geotermalnej do cieku, zamiast jej zatłaczania do warstwy wodonośnej?

- Na stronie 93<sup>1</sup> podano: „Organiczny cykl Rankine’a .... jest odmianą cyklu Rankine’a, tj. obiegu porównawczego dla procesów w których zachodzi parowanie i skraplanie czynnika roboczego.” → komentarz: parowanie i skraplanie zachodzi nie tylko w cyklu Rankine’a, ale też w innych obiegach porównawczych, a więc chyba to nie jest poprawna definicja tego obiegu ?

- Na stronie 93<sup>7</sup> podano: „Elektrownia wykorzystująca organiczny cykl Rankine’a jest przykładem elektrowni binarnej, ponieważ źródło ciepła oraz czynnik roboczy krążą w dwóch niezależnych obiegach, ...” → komentarz: patrz - podana powyżej uwaga dotycząca str. 13

- Na stronie 94<sup>4</sup> podano: „Rozprężanie par czynnika roboczego (proces 1-2) oraz praca pompy zasilającej (proces 3-4) powodują wzrost entropii, co uniemożliwia osiągnięcie maksymalnej teoretycznie sprawności przedstawionej równaniem 5.1 lub 5.2.” → komentarz: czym innym jest sprawność izentropowa turbiny / pompy, a czym innym sprawność obiegu.

Sprawność izentropowa turbiny wynika z nieodwracalności procesu ekspansji / rozprężenia (II ZT). Natomiast sprawność opisana równaniem 5.1 dotyczy obiegu Carnota realizowanego w ściśle określonym cyklu przemian (dwie izentropy / adiabaty odwracalne i dwie izotermy) → komentarz: ??

- Na stronie 100<sub>6</sub> podano: „Moc układu ciepłowniczego w układzie szeregowym jest praktycznie stała w ciągu roku, więc z ekonomicznego punktu widzenia układ taki powinien służyć wyłącznie pokryciu pewnej minimalnej (niekoniecznie najniższej) wartości obciążenia cieplnego, które występuje przez możliwie jak najdłuższy okres w ciągu roku”. → komentarz: Zapotrzebowanie mocy na cele ciepłownicze jest zmienne w czasie i w uproszczeniu zależy od temperatury otoczenia. Jak więc zinterpretować ww. tekst pracy?

## 2.4. Ocena strony redakcyjnej pracy

Uważam, że rozprawa została napisana stosunkowo zwięźle, klarownie i logicznie. Układ pracy jest prawidłowy, a kolejność rozdziałów nie budzi zastrzeżeń. Język użyty w pracy jest prawidłowy i tylko w niewielu miejscach wymaga korekty. Doktorant nie ustrzegł się jednak drobnych usterek o różnym charakterze, w tym redakcyjnych, stylistycznych i tekstowych. W tekście występują: błędy literowe, błędy odmiany wyrazów, skróty myślowe i niekiedy - mało precyzyjny opis. Poniżej wyszczególniłem jedynie ważniejsze z nich, np.:

- W dysertacji użyto liczne skróty i symbole wywiedzione po części z nomenklatury angielskiej. Wydaje się to zupełnie niepotrzebne, zwłaszcza w pracy w języku polskim. Tym bardziej, że prowadzi to czasami do sprzeczności z ogólnie przyjętymi w literaturze technicznej oznaczeniami, np.:

- str. 10, oznaczenie  $E_q$  odniesiono do wyposażenia (equipment), gdy tymczasem jest to standardowe oznaczenie odniesione do równania (equation);

- str. 123, oznaczenie  $LMTD_{PH}$  – jako średnia logarytmiczna różnica temperatur, gdy standardowe oznaczenie w literaturze z zakresu wymiany ciepła - to  $\Delta T_{log}$ ;

- str. 11, podano taki sam opis do dwóch różnych symboli - „shell” oraz „tube”, a ponadto może lepiej użyć oznaczeń „r” – przestrzeń rurowa; „p” – przestrzeń płaszczowa;

- str. 12, oznaczenie SW – jako słup wody, gdy standardowo przyjmowane jest s.w. (tym razem skrót z j. polskiego),

Moim zdaniem w pracy niepotrzebnie zastosowano symbole przeniesione z literatury anglojęzycznej, o czym np. świadczy wyżej podany skrót  $LMTD_{PH}$  (także inne), skopiowany z książki R. DiPippo: Geothermal Power Plants (wyd. III, str. 158). Tym bardziej, że rozbudowany system oznaczeń (symboli) utrudnia percepcję pracy.

- str. 13 (i inne), w pracy jest wielokrotnie używane określenie „elektrownia binarna” w odniesieniu do geotermalnej elektrowni jednoczynnikowej, co nie znajduje odzwierciedlenia w polskim nazewnictwie energetycznym, gdzie elektrownia binarna oznacza podwójny sprzężony układ z dwiema różnymi siłowniami (turbogeneratorami) pracującymi z dwoma różnymi czynnikami roboczymi, np. rtęć-woda czy woda-substancja niskowrząca (np. freon). Nie powinno się stosować określenia elektrownia binarna do siłowni ORC zasilanej wodą geotermalną, chyba, że woda geotermalna jest najpierw wykorzystywana w obiegu siłowni wysokotemperaturowej sprzężonej cieplnie (poprzez skraplacz-parowacz) z drugim obiegiem – niskotemperaturowym pracującym wg organicznego cyklu Rankine'a (ORC).

Ponadto:

- str. 15, co oznacza określenie „moce pasożytnicze” – w nomenklaturze polskiej poprawne określenie to: potrzeby własne elektrowni (instalacji);
- str. 48, w tekście powołanie na rysunek 1.2, którego brak jest w pracy;
- str. 117, wzory (6.2 – 6.3) – powinno być  $x = 1$ , a nie  $x = 0$ ;
- str. 164/165, błędna numeracji wzorów - powtórzenie numerów ze stron 152-154;
- str. 188 – błąd w spisie literatury – brak numeracji dla publikacji: Lund J., Boyd T., 2016: *Direct utilization of geothermal energy 2015 .....*);
- proponowałbym, aby w przyszłości nie posługiwać się pojęciem energii cieplnej, lecz energii przekazywanej na sposób ciepła, ewentualnie prościej – pojęciem ciepła.

Reasumując, pragnę jednoznacznie stwierdzić, że nie mam żadnych wątpliwości co do tego, że Doktorant prawidłowo zrealizował zamierzony cel pracy i udowodnił postawione w niej hipotezy. Nie mam też wątpliwości, że oceniana praca jest udanym eksperymentem badawczym, zrealizowanym na dobrym poziomie merytorycznym, a omawiany w niej problem ma duże znaczenie poznawcze, jak i użyteczne. Tym samym chcę zaznaczyć, że wymienione powyżej uwagi w niczym nie umniejszają mojej wysokiej oceny dysertacji.

### 3. WNIOSEK KOŃCOWY

Reasumując stwierdzam, że przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Macieja Miecznika, zatytułowana: *Model zrównoważonej eksploatacji wód geotermalnych w centralnej części Podhala do produkcji energii cieplnej i elektrycznej*, spełnia warunki określone w Ustawie z dnia 14.03.2003 roku *O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki* (Dz.U. z 2003 r. Nr 65, poz.595), stawiane rozprawom doktorskim. Zawiera bowiem oryginalne rozwiązanie zagadnienia naukowego oraz dowodzi odpowiedniej wiedzy Doktoranta przede wszystkim z obszaru geologii inżynierskiej, a w szczególności z zakresu modelowania numerycznego procesów wymiany masy i energii w odniesieniu do struktur geologicznych, ale także z obszaru wybranych zagadnień techniki cieplnej. Uważam, że podjęta przez Doktoranta tematyka badawcza jest trudna, ale ważna i istotna, przede wszystkim ze względu na perspektywy rozwoju geoenergetyki w Polsce. Uzyskane przez niego wyniki badań analitycznych mają, w moim przekonaniu, dużą wartość merytoryczną. Jestem również przekonany, że mgr inż. Maciej Miecznik jest w pełni przygotowany do samodzielnego prowadzenia pracy naukowo-badawczej.

**Na tej podstawie stawiam wniosek o przyjęcie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Macieja Miecznika, zatytułowanej *Model zrównoważonej eksploatacji wód geotermalnych w centralnej części Podhala do produkcji energii cieplnej i elektrycznej* i dopuszczenie jej do publicznej obrony.**

W mojej ocenie, Doktorant może ubiegać się o nadanie stopnia naukowego doktora w dyscyplinie: górnictwo i geologia inżynierska.

**Jednocześnie biorąc od uwagę wysoki poziom merytoryczny przedstawionej pracy doktorskiej, wnioskuję do Rady Naukowej IGSMiE PAN o jej wyróżnienie.**

