

Kraków, 9.01.2017 r.

Beata Kępińska, dr hab. inż., prof. IGSMiE PAN
Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN
ul. Wybickiego 7, 31-261 Kraków

Recenzja
Rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Michała Kaczmarczyka
pt. „Analiza i ocena możliwości produkcji energii elektrycznej
przy wykorzystaniu energii cieplnej zakumulowanej w wodach geotermalnych
na obszarze Województwa Małopolskiego”

Recenzja ww. Rozprawy doktorskiej została wykonana na podstawie pisma Dziekana Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH z dnia 11.10.2016 r. wynikającego z uchwały Rady Naukowej tego Wydziału z dnia 27.09.2016 r.

1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Recenzowana Rozprawa została wykonana w Katedrze Surowców Energetycznych WGGiOŚ AGH pod kierunkiem Pani dr hab. inż. Barbary Tomaszewskiej prof. AGH pełniącej w przewodzie doktorskim obowiązki promotora.

Rozprawa zawiera 192 strony tekstu, na który składa się 7 rozdziałów (w których znajduje się 31 tabel, 69 rycin oraz 69 wzorów), 14 stron spisu literatury (163 pozycje, w tym 88 polskich i 75 obcojęzycznych), 8 stron spisów rycin i tabel. Po tekście zamieszczonych jest 6 załączników graficznych (profilów stratygraficznych i termicznych wybranych otworów wiertniczych).

Układ pracy jest przejrzysty, a jej struktura poprawna. Rozdział 1 zawiera wprowadzenie w zakres Rozprawy, przedstawia jej cel, tezy, obszar badań, uzasadnia podjęte zagadnienia i podstawowe założenia. Rozdziały 2 i 3 stanowią tło wprowadzające do zasadniczej tematyki pracy: i tak rozdz. 2 naświetla obecny stan produkcji energii elektrycznej przy wykorzystaniu energii geotermalnej na świecie i w Europie, a także perspektywy w tym zakresie Polsce, podczas gdy rozdz. 3 omawia technologie produkcji energii elektrycznej przy wykorzystaniu energii geotermalnej, ze zwróceniem szczególnej uwagi na obieg organiczny Rankine'a (ORC) i cykl Kaliny wraz z przykładami instalacji odpowiednich dla warunków polskich, podając także podstawowe czynniki determinujące sprawność i moc elektrowni geotermalnej.

Zasadnicze dla Rozprawy są rozdziały 4-7, które przedstawiają wyniki własnych badań, analiz i prac Doktoranta, ich podsumowanie i wnioski końcowe.

Rozprawa jest nowatorska, wpisuje się w rozwijający się w Polsce od stosunkowo niedawna nurt badań i analiz dotyczący realnych możliwości generacji nie tylko ciepła, ale i energii elektrycznej przy zastosowaniu energii wód geotermalnych i odpowiada na rosnące zainteresowanie poznawcze i praktyczne. Trzeba podkreślić, że jest to jedna z pierwszych prac dotyczących perspektyw „geotermalnej” produkcji energii elektrycznej zarówno w Polsce, jak i w województwie małopolskim, oraz – w tak zaawansowanym ujęciu – w podhalańskim systemie geotermalnym.

Badania Doktoranta obejmowały dwa główne i z natury rzeczy odmienne nurty tematyczne, które umiejętnie połączył (co znalazło odzwierciedlenie także w kompozycji Rozprawy).

Pierwszy nurt – to aspekty geologiczne, hydrogeologiczne i termiczne:

- analiza wglębnej budowy geologicznej, warunków hydrogeologicznych i termicznych województwa małopolskiego pod kątem wskazania obszarów, gdzie mogą występować wody geotermalne o parametrach temperatury i wydajności perspektywicznych dla cyklu ORC i Kaliny. Do tego celu Autor wykorzystał wyniki wielu badań powierzchniowych i wglębnych, w tym m.in. 184 otworów wiertniczych, dane z kilku atlasów geotermalnych),

- mapy rozkładu temperatur wglębnych ww. województwa (po raz pierwszy dla całego województwa),
- wytypowanie lokalizacji perspektywicznych dla „geotermalnych” cykli ORC i Kaliny (na podstawie analizy wykonanych map oraz rozpoznania hydrogeologicznego i złożowego) – na Podhalu.

Drugi nurt – to aspekty energetyczne, w tym dwa modele obliczeń termodynamicznych dla cyklu ORC i Kaliny.

Efektom obu nurtów badań było w szczególności określenie przez Autora mocy i produkcji energii elektrycznej brutto ewent. instalacji elektrycznych w wytypowanych lokalizacjach perspektywicznych pod względem geologicznym i geotermalnym. Obliczenia wykonał dla cykli ORC i Kaliny przy różnych założonych wariantach wartości temperatur i strumienia wód (co wynikało z realnych warunków już pracujących otworów).

Zagadnienie, które Doktorant wybrał jako temat Rozprawy było zatem złożone i interdyscyplinarne, wymagające odpowiedniej wiedzy i warsztatu badawczego (w tym dobrej znajomości aparatu matematycznego), umiejętnego powiązania ww. nurtów i równomiernego rozłożenia akcentów tak, aby czytelną osią badań i rozważań była możliwość produkcji energii elektrycznej przy zastosowaniu wód geotermalnych (w Małopolsce) w technologiach binarnych (ORC, Kaliny). Autor bardzo dobrze sprostął temu wyzwaniu badawczemu.

Jest to m.in. zasługa starannego doboru informacji geologicznych, technologicznych, energetycznych, in. – ściśle pod kątem tematyki, bez zbędnych wątków i szczegółów, które nie mają bezpośredniego związku ze specyfiką geotermii i rozważanych w jej kontekście aspektów termodynamicznych technologii ORC i Kaliny.

Styl i tekst rozprawy może wydawać się przez to niekiedy lapidarny, jednak kryje się pod tym duża wiedza i orientacja Autora, właściwe powiązanie informacji, znaczący nakład pracy, analiz, itp. Dzięki temu Rozprawa jest przystępna zarówno od strony naukowej, poznawczej, jak i praktycznej. Ważnym jej elementem są staranne, jednolite stylistycznie ryciny, mapy, przekroje, a także zestawienia tabelaryczne i formuły wzorów / zależności matematycznych.

2. Omówienie Rozprawy

We Wstępie (s. 5–6) Autor podaje cel badań oraz przyjęte tezy Rozprawy doktorskiej.

Celem badań było „przeanalizowanie budowy geologicznej województwa małopolskiego pod kątem występowania oraz możliwości wykorzystania wód geotermalnych do celów produkcji energii elektrycznej oraz wskazanie najbardziej perspektywicznych lokalizacji o największym potencjale możliwej do uzyskania mocy elektrowni”.

Doktorant przyjął trzy tezy:

1. Analiza budowy geologicznej oraz parametrów hydrogeologicznych pod kątem pozyskania energii geotermalnej pozwala określić potencjalną produkcję energii elektrycznej, jaka można uzyskać w elektrowni geotermalnej,
2. Decydujący wpływ na efektywność produkcji energii elektrycznej oraz na wielkość mocy zainstalowanej elektrowni geotermalnej mają: temperatura wody geotermalnej oraz wydajność otworu produkcyjnego determinowane przez parametry fizyczne ośrodka skalnego,
3. Zasadność wykorzystania energii zakumulowanej w wodach geotermalnych o niskiej entalpii do produkcji energii elektrycznej, w oparciu o wykorzystanie organicznych lub nieorganicznych czynników roboczych, potwierdzają działające elektrownie geotermalne na świecie.

Ten przejrzysty rozdział jest bardzo dobrym wprowadzeniem w całość Rozprawy, podając tok postępowania i kolejność kroków badawczych, jakie zostały wykonane przez Doktoranta dla realizacji celu i potwierdzenia przyjętych tez. Jest to jednocześnie niejako uniwersalny algorytm (metodologia)

postępowania w każdym przypadku (a zatem nie tylko województwa małopolskiego), aby poznać i określić ewent. możliwości geologiczne, złożowe, eksploatacyjne, technologiczne i in. dla generacji / kogeneracji energii elektrycznej przy zastosowaniu niskotemperaturowych wód geotermalnych (tj. poniżej 125–150°C). Algorytm ten obejmuje nast. główne elementy:

- analizą dostępnych rozwiązań technologicznych,
- określenie minimalnych parametrów wód geotermalnych dla pracy siłowni,
- analizę budowy geologicznej i parametrów termicznych, hydrogeologicznych i in. badanego obszaru,
- Wytypowanie najbardziej perspektywicznego fragmentu/ów w analizowanym obszarze,
- Obliczenia termodynamiczne dla określenia mocy [i produkcji energii] ewent. elektrowni w cyklach ORC i Kaliny.

Elementy te były przedmiotem badań i analiz Doktoranta omówionych w kolejnych rozdziałach. W tym rozdziale wyjaśnia też podstawowe przyjęte definicje i określenia (m.in. „wody geotermalne”, „elektrownia geotermalna ORC”) i przekonująco uzasadnia ich stosowanie.

Rozdział 2 „Produkcja energii elektrycznej przy wykorzystaniu energii geotermalnej” (s. 7–21) zawiera przegląd stanu w tym zakresie na świecie i w Europie, koncentrując się na technologiach binarnych (ORC, Kaliny), gdyż takich dotyczyły badania Autora. Uzupełnieniem przeglądu jest wskazanie ewent. możliwości takiej generacji w Polsce – zgodnie z wynikami pierwszych badań, jakie wykonano w kraju w ostatnich latach (Wójcicki i in., 2013, Tomaszewska, Bujakowski [red.] i in., 2014).

Dla potrzeb opracowania tego przeglądu (podanego syntetycznie w tekście, a przede wszystkim w formie zestawień tabelarycznych) Doktorant przeprowadził studia publikacji zagranicznych, a także innych źródeł (m.in. EGEC, materiałów ze światowych i europejskich kongresów geotermalnych) z ostatnich lat, zweryfikował i wybrał najbardziej istotne informacje, co wzmacnia znaczenie tego przeglądu tym bardziej, że zwłaszcza w przypadku cyklu Kaliny są one bardzo skąpe. Istotne jest przy tym zwrócenie uwagi nie tyle na „klasyczne” elektrownie bazujące na parach geotermalnych, a na instalacje „binarne”, gdyż część z nich (zwłaszcza w Europie) stosuje w cyklu generacji energii elektrycznej wody geotermalne o temperaturach nawet już od 74°C. Takie instalacje stanowią odpowiednie przykłady dla warunków małopolskich (i polskich). Zdaniem recenzentki te właśnie fakty powinny być nawet jeszcze mocniej zaakcentowane, kiedy Autor wskazuje na dziesięć perspektywicznych lokalizacji w Polsce, w tym jedną na Podhalu (Bańską Niżną), jakie zawiera Atlas dot. możliwości generacji energii elektrycznej i ciepła przy zastosowaniu energii geotermalnej (Tomaszewska, Bujakowski [red.] i in., 2013).

Rozdział 3 „Technologie stosowane do produkcji energii elektrycznej przy wykorzystaniu energii geotermalnej” (s. 22–40) zawiera omówienie tych technologii i, podobnie jak Rozdział 2, skupia się na binarnych (ORC, Kaliny), w których wykorzystuje się wody geotermalne niskotemperaturowe. Tekst ilustrowany jest przejrzystymi rycinami, a uwagę zwraca m.in. ryc. 3.3 (s. 25) – porównanie na jednym schemacie cykli ORC i Kaliny.

W przypadku technologii ORC Autor wskazuje m.in. na znaczenie odpowiedniego doboru czynnika roboczego i podaje cztery przykłady geotermalnych elektrowni ORC najbardziej adekwatnych dla ewent. warunków polskich, m.in. ze względu na temperatury stosowanych wód (74–110°C): Chena Hot Springs – Neustadt-Glewe – Atheim – Bad Blumau. Zwraca przy tym słusznie uwagę na decydujący wpływ wartości parametrów tych wód – obok temperatur także ich wydajności (strumienia) na sprawność instalacji oraz osiągnięte moce (a w konsekwencji także możliwą produkcję energii elektrycznej). Podkreśla też, że pracują one w kogeneracji (gdzie priorytetem jest na ogół ciepło grzejne, co ma też swoje uzasadnienie ekonomiczne). Przykłady te są dobrze (wręcz esencjonalnie) opisane i przedyskutowane.

Omawiając natomiast cykl Kaliny i podając trzy przykłady odpowiednie dla warunków polskich (Husavik, Unterhaching, Bruchsal) Doktorant wskazuje, że jest on wart zainteresowania, gdyż, według literatury, w porównaniu z ORC może osiągać sprawność ok. 25% wyższą (s. 31) i szczegółowo opisuje przyczyny, dzięki którym jest to możliwe. Nasuwa się pytanie – czy także w warunkach rzeczywistych, a nie tylko obiegu badawczego w skali laboratoryjnej? Czy obecnie można bardziej optymistycznie (także z uwagi na aspekty środowiskowe) rozważać zastosowanie cyklu Kaliny, w którym używany jest m.in. amoniak?

Sporo uwagi poświęca Autor dyskusji wymienionych już czynników determinujących sprawność i moc „binarnej” elektrowni geotermalnej (rozdz. 3.3, s. 34–40): temperaturze wody geotermalnej, jej wydajności i właściwościom fizykochemicznym (w tym mineralizacji – wpływa ona na dwa podstawowe parametry – ciepło właściwe i gęstość wody geotermalnej uwzględniane przy szacowaniu mocy i sprawności elektrowni ORC lub Kaliny. W tym względzie Autor posłużył się metodyką bazującą na równaniach Sharqay i in. (2010) oraz Jamiesona i in. (1969), opisaną ostatnio przez Miecznika (2013)). Przeanalizował też systemy skraplania czynnika roboczego (odbioru ciepła przez medium chłodzące – tj. wodę lub powietrze) i uwarunkowania, które pozwalają na jak najwyższą sprawność geotermalnej elektrowni binarnej, a także – co warto zauważyć – okoliczności środowiskowe i prawne z tym związane (na te aspekty Autor wskazał jako jeden z pierwszych).

Rozdział 4 „Charakterystyka obszaru badań oraz zarys warunków hydrogeotermalnych” dotyczy kilku jednostek geostrukturalnych, które budują obszar województwa małopolskiego: zapadliska górnośląskiego, niecki miechowskiej, monokliny śląsko-krakowskiej, zapadliska przedkarpackiego i Karpat zachodnich.

Jest to kolejny rozdział będący realizacją założonego przez Autora toku badawczego zmierzającego do wyznaczenia struktur/obszarów zawierających wody geotermalne o temperaturach i wydajnościach, które rokowałyby pozytywnie w przypadku ewent. generacji energii elektrycznej. Autor położył akcent (i słusznie) na wybór i przedstawienie zespołu cech najbardziej istotnych pod względem geotermalnym. Zrobił to w ujednoczony i analogiczny sposób dla każdej z nich, podając dla każdej struktury zestaw informacji odnośnie skał złożowych (i potencjalnie zbiornikowych), temperatur węgłbnych formacji skalnych i wód (jeśli są obecne), perspektyw wynikających z opisanego stanu dla ewent. generacji energii elektrycznej przy zastosowaniu technologii binarnych. Dla przedstawienia typowo geotermalnej charakterystyki wymienionych struktur (stosunkowo licznych i zróżnicowanych zarówno między sobą, jak i wewnątrz) Autor prawidłowo zestawiał wybrane dane literaturowe dot. geologii, tektoniki, hydrogeologii, termiczne, wiertnicze (unikając nadmiaru nieistotnych w tym ujęciu treści szczegółowych, co nie jest regułą u wielu badaczy), co więcej – zilustrował je reprezentatywnymi przekrojami (z najbardziej istotnymi elementami tektoniki i termiki), zaczerpniętymi z wielu opracowań źródłowych, które ujednoczył, uwypuklając elementy najbardziej istotne dla rozważanej problematyki.

W wyniku dogłębnych analiz zgromadzonego materiału i stosując wcześniej wymienione kryteria (rozdz. 1, 2 – minimalne temperatury i wydajności wód z ujęć otworowych), w obszarze województwa małopolskiego Doktorant wskazał też wstępnie i uzasadnił jako perspektywiczny dla ewent. generacji energii elektrycznej jedynie rejon Karpat wewnętrznych (część Karpat Zachodnich), a ściślej – fragmenty podhalańskiego systemu geotermalnego, gdzie zlokalizowane zostały otwory w Bańskiej Niżnej (IG-1, PGP-1, PGP-3) i w Witowie (Chochołów PIG-1). Szczegółom tego zagadnienia jest poświęcony Rozdział 5.

Wymaga podkreślenia dobra znajomość przez Autora dotychczasowego rozpoznania województwa małopolskiego w zakresie ww. aspektów. Była ona podstawą zwięzłej i celnej charakterystyki geotermalnej tego województwa ukierunkowanej na zasadniczy temat pracy i wykonanej całościowo po raz pierwszy dla tej jednostki administracyjnej pod kątem możliwości generacji energii elektrycznej. Poszerzyło to wcześniejsze rozpoznanie ukierunkowane na wykorzystanie w celach ciepłowniczych, a także rekreacyjnych i leczniczych (jest to kolejne osiągnięcie Doktoranta).

Ze strony recenzentki nasuwa się kilka sugestii oraz kwestii do wyjaśnienia czy też dyskusji:

- w kilku przypadkach Autor podaje stosunkowo wysokie gradienty geotermiczne (do ok. 3,5 °C/100 m) – czy wartości te przyjął za literaturę, czy obliczał samodzielnie i w jaki sposób, zwłaszcza, czy dla warunków transportu ciepła przez przewodzenie (nie konwekcję) i czy temperatury wyjściowe odnoszone były do odpowiednich głębokości?,
- przekroje geologiczne – można je ewent. nieco uzupełnić poprzez zaznaczenie tych ich fragmentów, w których znajdują się wody o parametrach perspektywicznych dla generacji energii elektrycznej – dotyczy ta uwaga systemu podhalańskiego, którego przecież tylko niektóre fragmenty są obiecujące dla tych celów.

Rozdział 5 „Wytypowanie stref perspektywicznych na obszarze województwa małopolskiego” (s. 60–80) zawiera m.in. wyniki tych własnych badań i analiz Doktoranta, na podstawie których wytypował takie strefy. Biorąc pod uwagę fakt, że kluczowymi czynnikami wpływającymi na możliwość wykorzystania wód geotermalnych do generacji energii elektrycznej (technologie binarne) są ich odpowiednia temperatura oraz wydajność (strumień) na wypływie z ujęcia, Autor przyjął jednocześnie za minimalne wartości brzegowe w tym zakresie temperaturę 74°C i wydajność 100 m³/h wód. Argumentuje to przekonująco tym, że takie właśnie są minimalne parametry w kilku pracujących pomyślnie binarnych elektrowniach na świecie i w Europie, zatem – można je przyjmować dla analogicznych celów także w województwie małopolskim (Polsce).

W celu poznania przestrzennego rozkładu parametrów termicznych (w tym temperatur wglębnych górotworu i zawartych w nich wód /tam, gdzie one występują/) dla całego obszaru przedmiotowego województwa (ich punktowe wartości zostały podane dla otworów w rozdziale 4) – niezbędnej podstawy dla typowania stref perspektywicznych – Doktorant wykonał pięć map: gradientu geotermicznego na głębokości 0,5 m p.p.t. oraz temperatur wglębnych na głębokościach 1, 2, 3, 4 km p.p.t.). Wyjściowymi do ich konstrukcji były dostępne Autorowi dane z profilowań termicznych w warunkach ustalonych z 16 otworów wiertniczych, 48 pomiarów temperatur dna otworów i profilowań termicznych w warunkach nieustalonych z 42 otworów – wybrane po weryfikacji danych ze 184 otworów (z archiwów NAG, PGNiG). Z uwagi na fakt, że niewiele otworów było głębszych niż 2-3 km, dla większych głębokości oszacował temperatury korzystając m.in. z map gradientu geotermicznego (po ich uprzednim zdigitalizowaniu) i map rozkładu temperatur wglębnych zawartych w Atlasach geotermalnych: Niżu Polskiego, Karpat zachodnich, Zapadliska Przedkarpackiego (Górecki [red. nauk.] i in., 2006, 2011, 2012). Dygitalizację tych map Doktorant wykonał też dla korzystania z nich dla potrzeb swojego tematu z powodu niewystarczającej ilości wyjściowych danych termicznych, które byłyby dla Niego dostępne w innej formie.

Dla wykonania ww. map Autor zastosował metodykę opracowaną w KSE AGH (wykorzystał m.in. metodę krigingu jako dającą najlepsze wyniki dla map opracowywanych metodą interpolacji) oraz przytaczane w ww. publikacjach wzory do obliczania temperatur wglębnych i gradientu geotermicznego (analogiczne jak stosowane uprzednio przez innych autorów m.in. dla potrzeb wspomnianych atlasów) (s. 63–64).

Nasuwa się w tym miejscu uwaga – jakkolwiek te wzory są często stosowane przez niektórych autorów, to wskazane byłoby posługiwanie się raczej temperaturą tzw. warstwy neutralnej (8–10°C na głębokości 18–20 m p.p.t. w Polsce) zamiast średnioroczną temperaturą na głębokości 0,5 m p.p.t. Należy też zwracać uwagę, że obliczenia powinny odnosić się do warunków przewodzenia (a jeżeli w grę wchodzi konwekcja – to powinno to być zaznaczone). Ponadto – dokładność, z jaką pomiary PTu, pomiary dna otworu, a zwłaszcza PTn oddają rzeczywistą temperaturę otaczającego górotworu (i wód, jeśli są one w nim zawarte) jest różna i zależy od kilku czynników związanych m.in. z wierceniem i warunkami pomiarów. Wskazane byłoby uzupełnienie tego rozdziału o przynajmniej komentarz w tym zakresie.

Generalnie natomiast, zawarte w Rozprawie mapy termiczne są osiągnięciem Autora i wynikiem Jego żmudnej pracy – po raz pierwszy pokazał spójny obraz rozkładu przestrzennego wglębnych temperatur w całym województwie małopolskim (wcześniej był on rozproszony w kilku opracowaniach, m.in. w ww. Atlasach).

W kolejnych podrozdziałach Doktorant omawia uzyskany dzięki wykonanym przez siebie mapom rozkład wartości gradientu i temperatur wglębnych w poszczególnych jednostkach geostrukturalnych województwa małopolskiego, zwracając szczególną uwagę na te głębokości i rejony, gdzie temperatury wynoszą 70 i więcej stopni C i zestawiając te parametry ze stwierdzonymi lub potencjalnie możliwymi wielkościami wydajności wód z otworów. Łączy zatem dwa niezbędne elementy dla oceny ewent. potencjału i typowania najbardziej perspektywicznych rejonów dla rozważań o ewent. generacji energii elektrycznej przy zastosowaniu wód geotermalnych.

Co więcej: Autor – wskazuje też w niektórych przypadkach na rejony, gdzie możnaby rozważyć zasadność podjęcia badań dla rozpoznania struktur typu HDR czy też zastosowania technologii EGS (np. zapadlisko górnośląskie), gdyż istnieją ku temu przesłanki geologiczne i termiczne.

Ten ważny i jednocześnie bardzo wyważony Rozdział zwięźzony jest konkluzją, że z uwagi na jednoczesne spełnienie założenia co do minimalnej temperatury wody geotermalnej na 74°C i jej wydajności 100 m³/h, najbardziej perspektywiczne / korzystne warunki z punktu widzenia generacji energii elektrycznej posiada podhalański system geotermalny, a ściślej jego centralny fragment, gdzie znajdują się otwory Chochołów PIG-1 oraz Bańska: IG-1, PGP-1, PGP-3 (co Autor sygnalizuje w nieco innym ujęciu już wcześniej w rozdz. 4).

Wytypowany pod względem parametrów geotermalnych obszar był przedmiotem bardzo szczegółowych i specjalistycznych badań i obliczeń Doktoranta – już od strony termodynamicznej – [w ramach drugiego głównego nurtu pracy – co przedstawił w kolejnym rozdziale.

Rozdział 6 „Model obliczeń termodynamicznych” (s. 81–156) zawiera założenia, opis, wyniki i dyskusję takich obliczeń dla elektrowni w cyklu ORC i cyklu Kaliny z zastosowaniem wód geotermalnych z wytypowanych przez Autora ujęć otworowych w województwie małopolskim – systemie podhalańskim: w Bańskiej Niżnej (PGP-1, IG-1, PGP-3), Chochołowie (PIG-1) (dla porównania także z otworu Bukowina PIG-1).

Autor podkreśla, że w przypadku otworów, z których wody już są eksploatowane dla celów grzewczych (rejon Bańskiej Niżnej), w obliczeniach brał pod uwagę wytwarzanie zarówno energii elektrycznej (z części dostępnego strumienia wód) jak i ciepła; takie realistyczne podejście uwzględniające rzeczywiste warunki pracy wytypowanych otworów zwiększa znaczenie tych obliczeń i ich przydatność praktyczną (dla operatora tych ujęć).

Stąd też rozdział rozpoczynają podstawowe założenia dla obliczeń (rozdz. 6.1), w tym m.in.:

- dwa warianty pracy badanych ujęć otworowych – 1. wykorzystanie maksymalnego strumienia wody geotermalnej możliwej do pozyskania do generacji energii elektrycznej i 2. częściowe wykorzystanie tego strumienia kiedy jego część jest / będzie zagospodarowana dla potrzeb grzewczych lub też innych (np. do rekreacji) – wariant dla otworów najbardziej wydajnych, tzn. Bańska PGP-1 i PGP-3;
- stałe wartości temperatur, m.in.: 60°C dla temperatury wody na wyjściu z układu elektrowni geotermalnej (przy temperaturach na wejściu 86 i 82°C /64°C w przypadku otw. Bukowina PIG-1/); 25°C – stała wartość temperatury skraplania czynnika roboczego; 3°C – stała wartość temperatury przegrzania czynnika roboczego,
- czas pracy analizowanych elektrowni – 4000 h/rok,
- prowadzenie obliczeń dla mocy i produkcji energii elektrycznej brutto.

Zarówno w przypadku obliczeń dla cyklu ORC jak i Kaliny Autor korzystał z programu NIST REFTPROP 9.1, który zawiera m.in. bazę i charakterystyki czynników roboczych, a także, dla znanych (częściowo znanych) parametrów wejściowych podaje wartości szukanych parametrów termodynamicznych. Natomiast samodzielnie opracował zarówno uniwersalne modele obliczeń jak i wykonał same obliczenia już dla wytypowanych lokalizacji dla przyjętych wariantów i założonych parametrów, a w przypadku cyklu Kaliny – dobierał także optymalne ciśnienia. Zasluguje to na szczególne podkreślenie i dostrzeżenie dużego wkładu pracy Doktoranta, gdyż nie było wcześniej precedensu takich obliczeń w warunkach polskich, a procedury / algorytmy obliczeń z przypadków zagranicznych zwłaszcza dla cyklu Kaliny nie są upowszechniane (*zdaniem recenzentki, sam Doktorant swego wkładu wystarczająco nie zaakcentował (uznając może, że byłoby to niezręczne?)*).

Dla cyklu ORC Autor rozpoczyna od opisu jego modelowych obliczeń termodynamicznych dotyczących prognozy potencjału instalacji geotermalnych wykorzystujących ten cykl (R. 6.2, s. 82–98). Korzystając z bazy ww. programu NIST REFTPROP 9.1 wybrał cztery czynniki organiczne suche (R227ea, R600a, R236fa, R245fa) i dwa mokre (R1234yf, R134a). Na kolejnych stronach podane są podstawowe elementy ORC: turbina (połączona z generatorem), skraplacz (wraz z chłodnią), pompa zasilająca, podgrzewacz, parownik i przegrzewacz (które stanowiły przedmiot obliczeń), a następnie założenia i formuły obliczeń dla tych podstawowych elementów ORC z przyjęciem formuł obliczeń za ‘klasykiem’ w tym zakresie: DiPippo (2012), a także z uwzględnieniem formuł i podejścia stosowanych przez polskich autorów (Borsukiewicz-Gozdur i Nowaka (2007), a także Tomaszewskiej, Bujakowskiego [red.] i in. (2013)) i in. wymienianych w określonych miejscach Rozprawy. Tekst uzupełniony jest odpowiednimi rycinami.

Na tej obszernej podbudowie teoretycznej Doktorant przedstawia i dyskutuje wyniki własnych obliczeń termodynamicznych dla ewent. elektrowni ORC (rozdz. 3, s. 99-128, które mogłyby być zasilane wodą z ww. ujęć na Podhalu, ilustrując je wieloma wykresami i obszernymi tabelami. Jest to

bardzo interesująca i kluczowa część Rozprawy, informująca o zakresie wielkości możliwych do ewent. uzyskania mocy i produkcji energii elektrycznej brutto w analizowanym obszarze, w zależności od temperatur, strumienia wody geotermalnej, rodzaju zastosowanego czynnika roboczego, a także – sprawności takich elektrowni (do ok. 8%). Autor wskazuje także na wyniki obliczeń dla optymalnego / realistycznego wariantu dla otworów Bańska PGP-1 i PGP-3, czyli pracy układu ORC w kogeneracji z produkcją ciepła (w układzie równoległym), które wskazują na możliwość uzyskania mocy elektrycznej brutto w zakresie 45–1490 kW i produkcji energii elektrycznej 178–3264 kWh/rok (4000 h) w zależności od wielkości części strumienia wody geotermalnej (10–150 kg/s) w przypadku najbardziej perspektywicznego otworu Bańska PGP-1 (tab. 6.4, s. 102). Są to wielkości stosunkowo istotne i warte rozważenia co do ewent. realizacji w praktyce. Pozostając w „strefie” aplikacyjnej wskazuje też, że: całkowity strumień wody z otworu Bańska IG-1 mógłby z powodzeniem służyć do generacji energii elektrycznej (jest on tylko okresowo wykorzystywany jak źródło ciepła); woda ujęta otworem w Chochołowie może (powinna ?) służyć także generacji energii elektrycznej, a nie tylko do celów rekreacyjnych (jak to ma miejsce od 2015 r.), jeśli już nie jest przeznaczana do celów grzewczych (nad czym recenzentce tej pracy trudno przejść do porządku dziennego).

Wyniki obliczeń modelowych Autora potwierdzają zasadność energetyczną generacji energii elektrycznej w cyklu ORC (oraz Kaliny) przy istotnych mocach i energii brutto w niektórych rejonach Podhala – części województwa małopolskiego, które są porównywalne z osiąganymi w instalacjach zagranicznych o zbliżonych parametrach wód. Jest to zatem potwierdzenie 3. tezy pracy.

Autor nie zajmował się natomiast aspektami ekonomicznymi generacji energii elektrycznej (zarówno w cyklu ORC, jak i Kaliny), które dodatkowo przesądzałyby o zasadności realizacji takich rozwiązań w praktyce (jest to jednak zagadnienie odrębne i zbyt obszerne, aby włączyć je w omawiana Rozprawę i w żadnym stopniu nie wpływa na jej wysoką wartość i ocenę).

Domknięciem rozważań dot. ORC dla Podhala były natomiast obliczenia dla przypadku otworu w Bukowinie Tatrzańskiej (temperatura wody geotermalnej 64°C, maksymalny strumień 40 m³/h) – wyniki (mała moc <70 kW i produkcja < 270 MWh/rok) potwierdziły słuszność tezy Autora o podstawowym znaczeniu wartości temperatur i wydajności wody geotermalnej dla możliwości ich stosowania w cyklu ORC i Kalina. Potwierdziły one także zasadność przyjęcia przez niego określonych minimalnych wartości temperatury i strumienia wody geotermalnej.

Podobny układ i tok rozważań jak dla cyklu ORC Autor zastosował dla cyklu Kaliny (r.6.4 i 6.5, s. 121–156). Rozpoczął od opisu modelu obliczeń termodynamicznych dla tego cyklu (co podano i podkreślono wyżej), którego zasadniczymi elementami są:

turbina (połączona z generatorem), rekuperator niskotemperaturowy, skraplacz (połączony z chłodnią), pompa zasilająca, rekuperator wysokotemperaturowy, parownik i separator.

W obliczeniach uwzględniana była mieszanina amoniaku z wodą w proporcjach 87–89–92% (optymalne, dobrane przez Autora metodą prób i błędów). Z kolei Doktorant przedstawił tok (algorytm) modelowych obliczeń termodynamicznych wartości poszczególnych parametrów cyklu Kaliny z zastosowaniem wód geotermalnych. Autor posłużył się wzorami i formułami dostępnymi w literaturze (m.in. Guzovic i in., 2012, Akbari i in., 2014, DiPippo 2012) i wartościami parametrów z bazy danych programu NIST REFPROP 9.1. Podał też i omówił formuły obliczeń (analiz termodynamicznych) poszczególnych ww. elementów cyklu Kaliny. Integralną częścią tego fragmentu (ułatwiająca śledzenie toku obliczeń), podobnie jak wcześniej, są tabele i ilustracje.

W tym miejscu trzeba zauważyć, że „geotermalny” cykl ORC jest częściej i szerzej opisywany, jest też więcej dostępnych doświadczeń i przykładów praktycznych, które byłyby pomocne w badaniach Autora niż w przypadku Kaliny. Tym bardziej zasługuje na uwagę i uznanie podjęcie się przez Niego obliczeń i analiz drugiego z tych cykli, z uwzględnieniem optymalnego doboru zarówno proporcji mieszaniny amoniaku i wody, jak i analizy i doboru ciśnień z szerokiego zakresu.

Obliczenia dla otworów w Bańskiej Niżnej i Chochołowie zostały wykonane dla zakresu temperatur wody geotermalnej analogicznie jak dla ORC z uwzględnieniem mieszanin amoniaku i wody o podanych wyżej stężeniach, a także dla dwóch wariantów (wykorzystania całego maksymalnego strumienia dostępnej wody i jego części przy równoległej produkcji ciepła).

Omawiając i interpretując wyniki Doktorant skupia się na przedstawieniu uzyskanych wartości mocy i produkcji energii elektrycznej brutto, sprawności elektrowni, a także m.in. mocy turbiny. I tak m.in. największa moc i produkcja energii (brutto), jaka zostałaby uzyskana w cyklu Kaliny przy wykorzystaniu całkowitego strumienia wody geotermalnej z otworu Bańska PGP-3 wynosiłaby około

1568 kW, a roczna produkcja energii 6273 kWh (przy zawartości amoniaku 87% w mieszaninie roboczej i sprawności elektrowni 6,96%; s. 138, tab. 6.14, s. 139–140), w przypadku zastosowania części strumienia wody geotermalnej (wariant II) byłoby to odpowiednio mniej. Podobnie omawia przypadek otworu Bańska PGP-3, a obrazu dopełnia omówienie wyników dla otworu w Chochołowie.

Autor podkreśla, że zastosowanie cyklu Kaliny skutkowałoby uzyskiwaniem wyższych mocy i produkcji energii brutto niż w przypadku ORC. Nasuwa się zatem pytanie – dlaczego ten cykl stoi niejako „w cieniu” ORC w przypadku geotermii? Jakie, na podstawie dobrej orientacji w literaturze przedmiotu, jak i własnych obliczeń i rozważań Autora, są osiągnięte dotychczas rzeczywiste sprawności instalacji obu cykli i jakich wartości można się spodziewać w przyszłości? Jakie jest zdanie Doktoranta co do obecnie osiągniętych sprawności, a także tych, o których wspomina się w najnowszej literaturze i doniesieniach (tak ORC, jak i Kaliny)?

Bardzo istotnym i pomocnym elementem przedstawiania przez Autora wyników modelowych obliczeń termodynamicznych i ich interpretacji są wykresy i zestawienia tabelaryczne – zawierające zbiory uzyskanych wartości wielu parametrów. Są też dowodem na szeroki zakres i szczegółowość badań, a także rzetelność w ich przedstawianiu. Te unikalne jak dotychczas zestawienia będą też użyteczne dla celów praktycznych jako źródło wielu użytecznych informacji np. dla potrzeb rozważań związanych z decyzjami o ewent. „binarnych” elektrowniach geotermalnych.

Rozdział 7 „Podsumowanie i wnioski” to synteza wykonanych przez Autora badań i zastosowanych metod, których realizacja doprowadziły do uzyskania znaczących wyników o znaczeniu poznawczym, jak i aplikacyjnym, które jednoznacznie potwierdziły przyjęte przez Niego tezy.

Niejako zwieńczeniem tego rozdziału (i całej rozprawy) są zestawienia tabelaryczne i wykresy podsumowujące i porównujące uzyskane wyniki w odniesieniu do możliwych do uzyskania mocy (które można uznać za liczące się dla lokalnych celów: >500 kW brutto), produkcji energii elektrycznej brutto, sprawności w przypadku zastosowania wód geotermalnych w cyklach ORC i Kaliny (dla przyjętych wariantów i parametrów modelowych obliczeń termodynamicznych) w najbardziej perspektywicznym dla województwa małopolskiego obszarze – czyli centralnej części Podhala. Zestawienia te wskazują, że lepsze rezultaty energetyczne przyniosłby cykl Kaliny.

3. Ocena merytoryczna pracy, uwagi krytyczne i dyskusyjne

Badania Pana mgr. inż. Michała Kaczmarczyka obejmowały dwa nurty, których osią i zwornikiem była możliwość produkcji energii elektrycznej przy zastosowaniu wód geotermalnych w województwie małopolskim w technologiach binarnych (cykle ORC i Kaliny) przy uzyskiwaniu istotnych mocy i rocznej produkcji energii elektrycznej (brutto). Połączenie, komplementarna analiza i interpretacja wyników badań przyniosły interesujące i ważne wyniki, przedstawione w recenzowanej Rozprawie doktorskiej.

Wyróżnia ją duża wartość naukowa, poznawcza oraz istotne znaczenie aplikacyjne. Stanowi oryginalne rozwiązanie problemu badawczego. Jest nowatorska, odpowiada na rosnące zainteresowanie poznawcze i praktyczne, wpisując się w stosunkowo młody w Polsce nurt badań i analiz dotyczących realnych możliwości generacji nie tylko ciepła, ale i energii elektrycznej przy zastosowaniu wód geotermalnych. Z tych m.in. względów byłoby wskazane, aby recenzowana praca (lub przynajmniej jej fragmenty) była opublikowana zwłaszcza, że zawiera uniwersalne algorytmy postępowania i modele obliczeń termodynamicznych dla generacji energii elektrycznej w cyklach ORC i Kaliny – bardzo przydatne dla warunków polskich (i nie tylko) tym bardziej, że zostały opracowane i przedstawione po raz pierwszy i będą bardzo przydatne dla potencjalnych inwestorów i in. specjalistów zainteresowanych ewent. perspektywami w tym zakresie i realnymi wielkościami energetycznymi (dziedzina ta właśnie wkracza w Polskę w fazę początkowego rozwoju).

Autor bardzo dobrze sprostął wyzwaniom podjętego tematu, realizując go w sposób świadczący o umiejętności prowadzenia samodzielnej pracy naukowej, bardzo dobrym opanowaniu warsztatu badawczego, przy krytycznym i wyważonym podejściu do uzyskiwanych wyników, a także

wiedzy i pasji badawczej Autora. Uzyskane wyniki są podstawą interesującej i oryginalnej pracy naukowej, przedstawione w sposób przekonujący i jasny.

Biorąc pod uwagę podstawowe aspekty i wymogi, jakie powinna spełniać rozprawa doktorska, stwierdzam, że wybór tematu był trafny, a sformułowanie tez i problemów badawczych, zastosowane metody badań – właściwe. Doktorant zrealizował zamierzony cel pracy i udowodnił założone tezy.

Rozprawa jest stosunkowo zwięzła (164 strony głównego tekstu), co trzeba uznać za zaletę. Jej ważnym i komplementarnym elementem są staranne, jednolite stylistycznie ryciny, mapy, przekroje, a także zestawienia tabelaryczne i formuły wzorów / zależności matematycznych.

Praca ma dobry poziom pod względem redakcyjnym i językowym (uchybień są niewielkie, dotyczą głównie interpunkcji). Niektóre powołania na literaturę, podpisy tabel i rycin wymagają nieznacznych poprawek i uzupełnień (odnośne uwagi podano na końcu tej recenzji (s. 10) i w tekście Rozprawy). Podane uwagi nie umniejszają jej bardzo wysokiej wartości i oceny.

4. Wniosek końcowy

Stwierdzam, że recenzowana Rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Michała Kaczmarczyka pt. „Analiza i ocena możliwości produkcji energii elektrycznej przy wykorzystaniu energii cieplnej zakumulowanej w wodach geotermalnych na obszarze Województwa Małopolskiego” spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim przez przepisy Ustawy z dn. 14.03.2003 r. O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2003 r. Nr 65).

Wniosuję zatem o przyjęcie ww. Rozprawy doktorskiej i o dopuszczenie Pana mgr. inż. Michała Kaczmarczyka do dalszych etapów przewodu doktorskiego i publicznej obrony.

Ponadto – z uwagi na wysoki poziom merytoryczny, Rozprawa kwalifikuje się do wyróżnienia (o ile spełnia określone warunki).

Beata Kępińska

Uwagi dot. strony redakcyjnej i technicznej Rozprawy doktorskiej

- Cytowanie literatury, źródeł danych i informacji:
 - w niektórych przypadkach korekty wymaga sposób cytowania opracowań zbiorowych i pod redakcją, a także uwzględnianie w Spisie literatury wszystkich autorów cytowanych w tekście pozycji wieloautorskich (przypadki te zaznaczono w tekście pracy),
 - sposób powoływania się na źródła w podpisach do rycin i tabel wymaga sprawdzenia co do ich poprawności (niektóre inne szczegóły w tym zakresie zaznaczono w tekście).
- Interpunkcja i stylistyka:
 - używanie przecinków – tekst wymaga korekt (co zaznaczono w tekście Rozprawy),
 - literówki – w kilku przypadkach,
 - kilka sugerowanych zmian używanego słownictwa zaznaczono w tekście Rozprawy.
- Ryciny i tabele:
 - objaśnienia do niektórych rycin i tabel wymagają drobnych uzupełnień i korekt (co zaznaczono bezpośrednio w tekście).

Inne uwagi, propozycje uzupełnień, uściśleń, korekt, itp. są zaznaczone bezpośrednio w tekście Rozprawy (mogą być przydatne podczas jej ewent. przygotowywania do publikacji).