

dr hab. Przemysław Bukowski, prof. GIG
Główny Instytut Górnictwa
w Katowicach

Recenzja

pracy doktorskiej mgr inż. Michała Kaczmarczyka pt.:

*Analiza i ocena możliwości produkcji energii elektrycznej przy wykorzystaniu energii cieplnej
zakumulowanej w wodach geotermalnych na obszarze województwa małopolskiego*

Podstawy formalno-prawne.

Podstawę prawną stanowi Ustawa z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach naukowych i tytule naukowym w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595 z późn. zm.) oraz decyzja Rady Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie z dnia 27.09.2016 r. Zgodnie z tą decyzją, pismem WGGiOŚ 422/2016 z dnia 11.10.2016 r. zlecono mi opracowanie recenzji rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Kaczmarczyka (tytuł powyżej). Wraz z pismem przewodnim dostarczono mi jeden egzemplarz trwale oprawionego wydruku pracy doktorskiej.

W piśmie przewodnim wskazano mi warunki sporządzenia recenzji, termin jej wykonania oraz liczbę egzemplarzy i sposób jej przekazania. Do pisma dołączono uchwałę Rady Wydziału z dnia 4 lipca 2016 r. w sprawie wyróżniania prac doktorskich, która zawiera wykaz warunków koniecznych do spełnienia przez Doktoranta.

Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Opiniowana rozprawa doktorska została opracowana na 192 ponumerowanych stronach, wliczając w to dwustronicowy wstęp, pięć rozdziałów merytorycznych o objętości 156 stron, które Autor zakończył zilustrowanym tablicą i diagramami, spisanim na 8 stronach, rozdziałem zatytułowanym "Podsumowanie i wnioski". Treść rozprawy została zaopatrzona w spis literatury obejmujący 162 pozycje literatury krajowej i zagranicznej, z czego 50% stanowi literatura anglojęzyczna. W spisie literatury także wskazano jedną dyrektywę europejską, jeden dokument Ministerstwa Gospodarki, trzy ustawy i stronę internetową dla obszaru będącego przedmiotem oceny. Bogate zilustrowanie prac wykonanych przez Doktoranta prezentują spisy: 69 rysunków i 25 tabel, zamieszczonych w treści rozprawy. Pracę doktorską zamyka sześć kart ilustrujących uproszczone profile litostratygraficzne wybranych otworów wiertniczych.

Tytuł rozprawy doktorskiej, w moim przekonaniu, już na wstępie w pełni oddaje jej zawartość, uważam jednak, że jest zbyt długi i można byłoby go nieco uprościć.

Spis treści ilustruje logikę przyjętą przy redagowaniu pracy. Na podstawie spisu treści można bez trudu wyodrębnić wstępną część pracy, opartą głównie na literaturze, jak również część wprowadzającą do prezentacji wyników i omówienia wyników pracy uzyskanych i przeanalizowanych przez Doktoranta. Za prawidłowe uważam proporcje objętości poszczególnych rozdziałów rozprawy, a udokumentowanie wkładu własnego doktoranta zawarte zostało w ramach czterech rozdziałów końcowych stanowiących blisko 70%

objętości dysertacji. Po przestudiowaniu zawartości rozdziałów 6.2 i 6.4, które powstały na podstawie literatury, udział własny Autora pracy się nieco zmniejszy.

Treść rozprawy doktorskiej

Praca jest starannie zredagowana i wydana oraz dobrze zilustrowana z nielicznymi tylko błędami literowymi i stylistycznymi. Treść pracy jest napisana jasnym językiem.

W rozdziale 1 dysertacji (Wstęp), jej Autor już na początku informuje o celu pracy oraz stawia trzy zasadnicze tezy, które zamierza udowodnić.

Celem pracy była analiza budowy geologicznej województwa małopolskiego w aspekcie perspektyw i możliwości wykorzystania wód geotermalnych w kierunku produkcji energii elektrycznej oraz wskazanie potencjalnych orientacyjnych lokalizacji ewentualnych przyszłych inwestycji energetycznych.

Cel pracy został sformułowany jasno, a w jego treści Doktorant określił zarówno cel naukowy, jak i wyraźny cel praktyczny - wskazanie lokalizacji ewentualnych przyszłych inwestycji energetycznych. Proponowałbym jednak stosowanie w tej części pracy, jak i w treści całej pracy, moim zdaniem znacznie lepszej, proponowanej przez Doktoranta terminologii ujętej w rozdziale 1. Zalecałbym jej zastosowanie przy ewentualnej publikacji pracy doktorskiej. Proponowana terminologia wraz z jej objaśnieniem i uzasadnieniem mogłaby stanowić aplikację w ramach ewentualnych wniosków do zmiany Prawa geologicznego i górniczego w zakresie zmian terminologicznych.

Tezy postawione w dysertacji brzmią:

1. *„Analiza budowy geologicznej oraz parametrów hydrogeologicznych po kątem pozyskania energii geotermalnej, pozwala określić potencjalną produkcję energii elektrycznej, jaką 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”.*

Uważam, że już treść tez pracy, postawionych w ramach rozdziału 1 wskazuje na prawidłowe sformułowanie problemu badawczego i utylitarne, a także, że Doktorant prawidłowo zaplanował postępowanie dowodowe. W toku charakterystyki i uzasadnienia dla zajęcia się tematem pracy Doktorant wskazuje na skoncentrowanie się i rozwinięcie tematyki wykorzystania energii geotermalnej w procesie konwersji na energię elektryczną ze szczególnym uwzględnieniem możliwości i warunków naturalnych występujących w Małopolsce. Wskazuje także na dokonanie analizy porównawczej i oceny możliwości oraz efektywności procesu konwersji z zastosowanie dwóch różnych technologii Obiegu Organicznego Rankine'a (ORC) i Cyklu Kaliny.

Rozdział 2 - stanowi omówienie stanu wykorzystania energii geotermalnej w procesach konwersji na energię elektryczną i do produkcji energii elektrycznej na świecie, w Europie i w Polsce. W preambule rozdziału, na podstawie dostępnych danych GUS i w nawiązaniu do wymagań uregulowań prawnych Doktorant omawia statystyki udziału energii OZE wskazując na energię geotermalną jako stabilne i perspektywiczne źródło energii, także dla przetworzenia jej na energię elektryczną. Omawia kolejno: elektrownie na świecie, w Europie i w Polsce, przytaczając dane historyczne i publikowane od pierwszego eksperymentu przeprowadzonego we Włoszech po stan obecny, w tym dane dotyczące temperatury wód

geotermalnych i wydajności otworów geotermalnych. Z przeprowadzonego omówienia wynika, że zainteresowanie konwersją energii cieplnej wód geotermalnych na energię elektryczną stale rośnie, co m.in. przejawia się planami podwojenia mocy zainstalowanej tego typu elektrowni do 2020 r. w stosunku do 2015 r. Autor pracy wskazuje na interesujące Jego zdaniem wyniki analizy zastosowań z uwzględnieniem podziału na technologie, spośród których technologie oparte na Cyklu Kaliny są w stadium wczesno-rozwojowym (rys. 2.2). Stąd nasuwa się pytanie, skąd tak duże zainteresowanie Autora tą właśnie technologią, skoro brak doświadczeń z zastosowań i wdrożeń (są tylko 3 realizacje w świecie), a jak napisano w rozdziale 2.3, w Polsce brak jakiegokolwiek elektrowni geotermalnej.

Jednocześnie Doktorant przywołuje prace z lat ubiegłych (z 2014 r.) i przytacza ich wyniki dla Polski. Mając świadomość, że jest to rozdział dotyczący rozpoznania zagadnienia, Doktorant w wystarczającym stopniu przytacza informacje i sygnalizuje, które z omawianych w literaturze potencjalnych rejonów dotyczą Jego obszaru badań wskazując tylko jedną potencjalną lokalizację, którą omówiono w publikacjach z 2014 r.

Interesujące moim zdaniem są zestawienia, które dotyczą mocy zainstalowanej i produkcji energii elektrycznej elektrowni opartych na wodach geotermalnych z wykorzystaniem technologii ORC (tab. 2.1 ÷ 2.6). Jednakże w tabeli 2.4 zwracają uwagę adnotacje w pozycji "Produkcja" w wierszach 6 i 8. Poniżej tabeli spodziewałbym się, chociaż krótkiego wyjaśnienia opisanego w uwadze stanu rzeczy, a zwłaszcza wyjaśnienia adnotacji o przyczynach braku opłacalności utrzymywania elektrowni w technologii ORC Neustadt-Glewe. Proszę o wyjaśnienie.

Rozdział 3. Stanowi omówienie technologii stosowanych do produkcji energii elektrycznej przez konwersję energii geotermalnej w rozbiciu na dwa nurty technologiczne ORC i Cykl Kaliny. Doktorant omawia przy tym zasady i schemat działania technologii oraz omawia wymagania stawiane dla wybranych realizacji elektrowni geotermalnych, ich parametry techniczno-technologiczne, temperatury wód, liczbę otworów i ich głębokości, uzyskiwane wydajności i natężenie wypływu wód, aspekty ekonomiczne i środowiskowe. Przechodzi do omówienia czynników decydujących o sprawności i mocy elektrowni geotermalnych, jak: temperatura wód, wydajność otworu geotermalnego, właściwości fizykochemiczne wód oraz aspekty środowiskowe związane z procesem schładzania wydobytej wody geotermalnej.

Treść rozdziału w wystarczającym stopniu wyjaśnia zasady warunki i wymagania stawiane instalacjom energetycznym typu ORC. Z mojego punktu widzenia, jest cenne, iż zawiera materiał wyselekcjonowany przez Doktoranta w kierunku ewentualnych porównań warunków funkcjonowania instalacji istniejących w świecie do warunków polskich, a zwłaszcza w Małopolsce. Jednocześnie w tym podrozdziale Doktorant wskazuje uwarunkowania decydujące o powodzeniu pracy instalacji, zwłaszcza na najniższe temperatury wody geotermalnej, przy stosunkowo małej wydajności otworów produkcyjnych. W tej części pracy widać zamysł Autora, w którym wskazuje On na graniczne (dolne) wartości czynników (temperatura i wydajność) decydujących o możliwości konwersji energii cieplnej na elektryczną, przy dodatnim bilansie ekonomicznym inwestycji.

W rozdziale 3.2. Doktorant w wystarczającym stopniu omawia technologię w Cyklu Kaliny i wskazuje na różnice w stosunku do technologii ORC oraz charakteryzuje potencjał tkwiący w tej najmłodszej technologii konwersji energii cieplnej na mechaniczną i elektryczną. Omawia jedyne istniejące w świecie realizacje elektrowni geotermalnych z wykorzystaniem Cyklu Kaliny. Wskazuje na ewentualne zalety i wady technologii, w tym na korozyjność układu i jak można się domyślić na wpływ tzw. kawitacji wirników turbiny. Nie omawia ewentualnej spodziewanej żywotności elektrowni opartych na tej technologii. W tym miejscu prosiłbym o nieco szersze naświetlenie przewidywań, co do możliwości i niezawodności pracy elektrowni na bazie amoniaku.

Dobrze opracowany rozdział 3.3. jest moim zdaniem jednym z kluczowych dla udowodnienia tez postawionych w pracy doktorskiej oraz dla przebiegu dalszych badań Doktoranta oraz wskazania przez niego granicznych warunków oraz szacunkowych obliczeń dla potencjalnych zastosowań w Polsce. W oparciu o doświadczenia światowe z pracy istniejących elektrowni geotermalnych Doktorant porządkuje najważniejsze czynniki wpływające na moc i sprawność potencjalnej elektrowni geotermalnej w technologii ORC. Następnie wskazuje na wartość 74°C, jako wartość graniczną temperatury wody geotermalnej, oraz czynnik R600a - izobutan, jako najkorzystniejszy w pracy elektrowni w technologii ORC. Doktorant nie przytaczając konkretnych wartości, wskazuje na natężenie wypływu wody geotermalnej z otworu (wydajność otworu), jako kolejny głównych czynnik kryterialny stwierdzając, że im większa wydajność cieplna układu i wielkość strumienia czynnika roboczego w technologii ORC tym większa moc elektrowni geotermalnej. W oparciu o dane literaturowe omawia wpływ jakości wód geotermalnych na wynik oszacowań sprawności i mocy elektrowni geotermalnej podając zakresy stosowalności wzorów i wstępne oszacowania zakresu względnego błędu dla potencjału geotermalnego wód. W końcowych fragmentach tekstu (rozdział 3.3.4.) Autor pracy omawia warunki chłodzenia i temperatury skraplania czynnika roboczego, wskazując na bardzo duże ich znaczenie dla mocy i sprawności funkcjonowania elektrowni. Za optymalne warunki uznał stabilną temperaturę czynnika chłodniczego, która nie przekracza kilku stopni Celsjusza.

Nasuwa się zatem pytanie do Doktoranta, jak naturalne uwarunkowania klimatyczne i hydrologiczne w obszarze Jego badań (nie są omówione) mogą wpłynąć na planowanie inwestycji - elektrowni geotermalnej ?

Rozdział 4, to charakterystyka obszaru badań oraz zarys panujących w nim warunków hydrogeotermalnych. Z treści tego rozdziału nie wynika, jaki obszar jest obiektem badań Doktoranta. Deklarując w temacie pracy obszar województwa małopolskiego, w rozdziale 4 niepotrzebnie nadmiernie wykracza poza założony poligon badań. Wstęp do tego rozdziału pracy powinien wskazywać na zasięg analizy i objęcia nią nie tylko terenów w granicach województwa, lecz także terenów przyległych jednostek geostrukturalnych np. całego zagłębia górnośląskiego (GZW) i innych omawianych dalej rejonów. Uważam, że Autor pracy nadmiernie wykroczył poza założony obszar badań zwłaszcza, że w zestawieniu z Jego poligonem badań, obszary przyległe charakteryzuje w sposób dość niejednolity i niepełny. Jeżeli Autor zajął się tylko obszarem GZW, to w związku z faktem występowania bardziej obiecujących warunków w zachodniej i południowo-zachodniej części zagłębia, poza obszarem badań doktorskich (rys.5.1.), powołując się na literaturę, w tym względzie należałoby wskazać wyniki prac badaczy z innych, głównie śląskich ośrodków naukowych.

Nie podzielam zdania Doktoranta odnośnie małych perspektyw energetycznych związanych z wodami i górotworem w GZW, zestawionych w nawiązaniu do krótkich i moim zdaniem niewystarczających informacji dotyczących stanu górnictwa podziemnego, a także do zawodnienia kopalń w procesach likwidacyjnych. Doktorant nie zawarł w treści tego rozdziału oceny sytuacji związanej z występowaniem obszarów anomalii termicznych (rysunek 5.1) występujących na terenie GZW poniżej poziomu udostępnienia złoża węgla kamiennego.

Omawiając budowę geologiczną Doktorant już w tym rozdziale dokonał selekcji obszarów i wytypował perspektywiczne oraz mało perspektywiczne rejony obszaru badań, ze szczególnym uwzględnieniem możliwości uzyskania wysokich temperatur wód, przy możliwie wysokiej wydajności otworów. Jako jedną z głównych i perspektywicznych jednostek omawia rejon Karpat Wewnętrznych z niecką podhalańską i Tatrami. Za rejon najbardziej obiecujący, na podstawie literatury, Doktorant uznaje nieckę podhalańską.

Rozdział 5. Konsekwencją przeprowadzonej w rozdziale 4 analizy budowy geologicznej i warunków hydrogeotermalnych oraz wskazania w rozdziale 3 czynników korzystnych dla

konwersji energii cieplnej na elektryczną, przyjętych jako czynniki kryterialne (zwłaszcza temperatura i wydajność otworu), Doktorant opracował rozdział, którego celem było wskazanie perspektywicznych obszarów wykorzystania energii geotermalnej do produkcji energii elektrycznej w technologii ORC i Cyklu Kaliny. Jako dolną granicę temperatury wód przyjął $t = 74^{\circ}\text{C}$ a wydajność minimalną $100 \text{ m}^3/\text{h}$. Za ważny parametr kształtujący temperaturę wód uznał ponadto gęstość ziemskiego strumienia cieplnego i właściwości termiczne środowiska geologicznego. Na podstawie analizy danych geologicznych i technicznych dotyczących 184 głębokich otworów wiertniczych, w których prowadzono badania i obserwacje Doktorant wyselekcjonował przydatny do dalszych analiz zbiór kilkudziesięciu otworów wiertniczych. Selekcję przeprowadził z uwagi na stan rozpoznania warunków w otworach i różne czynniki, w tym: głębokość, czas istnienia, temperaturę wód. Na tej podstawie podjął ocenę termiki górotworu z uwzględnieniem zmienności stwierdzonej i prognozowanej dla głębokości 0,5, 1000, 2000, 3000 i 4000 m.

Należy podkreślić, że znaczną część pracy, która pozostaje niewidoczna, poza jej efektem końcowym, Doktorant zawarł w opracowanych mapach tematycznych w celu wyznaczenia obszarów perspektywicznych dla wykorzystania wód geotermalnych dla celów energetycznych, w tym do konwersji energii cieplnej na energię elektryczną. Charakteryzując przyjęte założenia i sposób obliczeń opracował mapę gradientu geotermicznego i dokonał zobrazowań rozkładu temperatur dla różnych głębokości. Stwierdził, że od głębokości 2000 m wartością kryterialną 74°C jest objęty cały obszar będący przedmiotem Jego badań, a jednocześnie do głębokości 4000 m wskazał rejon najbardziej perspektywiczne z uwagi na temperaturę wód.

W oparciu o dane literaturowe i dane z otworów Doktorant analizował obszar badań z uwagi na czynnik wydajności potencjalnej ujęcia geotermalnego, generalnie wskazując dla technologii ORC i Cyklu Kaliny niekiedy podhalańską, jako obszar najbardziej perspektywiczny $t > 74^{\circ}\text{C}$ i $Q > 100 \text{ m}^3/\text{h}$ natomiast z uwagi na małe wydajności otworów w rejonach o największej temperaturze wód wskazuje raczej kierunek wykorzystania tzw. *suchych gorących skał* (w ramach EGS) do przyszłego rozważenia, jako źródła energii cieplnej przewidzianej do konwersji na elektryczną. Doktorant wskazuje przeszkody dla bardziej dokładnego określenia obszarów perspektywicznych, z których główna, to brak danych z wierceń dla rozpoznania głębokiego podłoża, których od lat 80/90 XX wieku praktycznie się nie wykonuje.

Z uwagi na poprawność wskazania obszarów perspektywicznych, jest interesujące, czy i jakie zdaniem Doktoranta można podjąć działania dodatkowe dla zwiększenia prawdopodobieństwa powodzenia przyszłej inwestycji w elektrownię geotermalną w rejonie Karpat?

Rozdział 6. stanowi zasadniczą część przeprowadzonych prac i dotyczy zbudowania modelu termodynamicznego dla zoptymalizowania warunków pracy elektrowni geotermalnych w przyszłości. Założeniem do prac był wynik analizy doświadczeń w pracy elektrowni geotermalnych na świecie i przyjęcie występowania koniecznej współprodukcji energii elektrycznej i cieplnej. Stąd w pracy podjęto badania nad pełnym wykorzystaniem strumienia wód geotermalnych z ujęcia geotermalnego i wykorzystania tylko części wód geotermalnych. Założono, że woda geotermalna po wykorzystaniu do konwersji energii cieplnej na elektryczną będzie miała nie mniej niż 60°C , a zatem będzie jeszcze zdatna do wykorzystania w energetyce cieplnej. Przedstawiono założenia początkowe a następnie metodykę obliczeń termodynamicznych dla ORC (rozdz. 6.2) i Cyklu Kaliny (rozdz. 6.4). Zasadniczą część prac Doktoranta obejmuje wyniki przeprowadzonych przez Niego obliczeń i badań dla elektrowni w technologii ORC (rozdz. 6.3) i w Cyklu Kaliny (rozdz. 6.5), które zostały wykonane dla rejonu podhalańskiego na pięciu przykładach otworów o znanych danych początkowych. W rozdziale 6 Autor dokonał opartej na literaturze analizy elementów

ciągu technologicznego w cyklu technologicznym ORC i w Cyklu Kaliny. Testując obie technologie z założeniami zawartymi we wcześniejszych rozdziałach oraz według metod znanych z literatury, wskazał algorytm postępowania w ocenie efektywności instalacji energetycznych konwertujących energię cieplną na elektryczną, a opartych na wodach geotermalnych o niskiej entalpii. Doktorant wykazał większą efektywność instalacji opartych na technologii pracujących według Cyklu Kaliny od instalacji w technologii ORC. Przy czym, dla technologii ORC testował cztery suche i dwa mokre czynniki robocze, natomiast w Cyklu Kaliny przeprowadził optymalizację składu procentowego mieszaniny wody i amoniaku dla trzech stężeń: 85%, 87% i 89%, jako substancji roboczej. Skutkiem czego wskazał na 87% zawartość amoniaku w czynniku roboczym, jako najbardziej efektywną mieszaninę czynnika roboczego/chłodniczego w konwersji energii cieplnej na energię elektryczną. W tym rozdziale pracy widoczny jest bardzo duży zakres obliczeń, ukryty głównie w licznych wynikowych zestawieniach tabelarycznych i wykresach.

Analizując zawartość rozdziału można stwierdzić, że przy przyjętych wejściowych dostępnych danych i założeniach, Doktorant w sposób jednoznaczny i przekonujący rozstrzyga i wskazuje preferowany kierunek rozwoju elektrowni geotermalnych opartych na Cyklu Kaliny. Jednocześnie nasuwają się pytania dotyczące sugestii Doktoranta, co do dalszych badań nad ewentualnymi wątpliwościami, problemami i dalszym rozwojem tej technologii, a których omówienia nie zawarł w pracy. Pytania, które się nasuwają, to np. jaka jest zdaniem Doktoranta przewidywana trwałość takich elektrowni, jakie ryzyka i zagrożenia wiążą się z jej eksploatacją, tak w odniesieniu do bezpieczeństwa powszechnego, jak i środowiskowego, jaka powinna być optymalna liczba i parametry otworów geotermalnych i od czego może zależeć, a także jaki może być wpływ przepisów Prawa geologicznego i górniczego, wodnego, o ochronie środowiska, energetycznego, itp. na ich realizację.

Rozdział 7. Podsumowanie i wnioski. Ten rozdział pracy ma raczej charakter podsumowania jej wyników i nakreślenia zakresu osiągnięcia zaplanowanych celów i udowodnienia tez pracy postawionych w rozdziale 1. Z uwagi na brak wyodrębnienia z treści tego rozdziału stwierdzeń o charakterze wniosków, rozdział ten w moim przekonaniu powinien być zatytułowany np. „Podsumowanie i stwierdzenia końcowe”. Z treści rozdziału wynika, co jest pracą i myślą Doktoranta, a co wynika ze studiów literaturowych. Spośród wskazanych w pracy lokalizacji perspektywicznych dla uzyskania odpowiednich mocy i produkcji elektrowni za najbardziej obiecujący rejon uznał podhalański system geotermalny i stwierdził, że jest możliwe zaimplementowanie obu rozpatrywanych przez Niego w pracy technologii ORC i Cyklu Kaliny, przy czym efekt mocy elektrowni i produkcji energii elektrycznej brutto przemawia na korzyść tej drugiej. Jednocześnie Autor pracy wskazuje na kluczowe znaczenie temperatury wody geotermalnej i wydajności otworu geotermalnego jako czynników oceny.

Stwierdzenia końcowe, które wysnuł Autor pracy, są moim zdaniem adekwatne do uzyskanych wyników badań i prawidłowo sformułowane. Uważam także, że dla przyjętego i zamierzonego do zrealizowania zakresu prac, tezy postawione w pracy zostały udowodnione a cel badawczy osiągnięty.

Uwagi do treści i ocena rozprawy doktorskiej

Wybór tematyki badawczej, jak również sprecyzowanie tematu pracy doktorskiej wychodzą naprzeciw wymaganiom stawianym przez Parlament Europejski i Radę Europy w zakresie promowania wykorzystywania energii ze źródeł odnawialnych i w zakresie ochrony środowiska. Wybór tematyki pracy doktorskiej uważam za uzasadniony z kilku względów:

- brak w Polsce elektrowni geotermalnych,

- występowanie stosunkowo małych temperatur wody geotermalnej nawet na dużych głębokościach, determinujący dobór wybranych przez Doktoranta technologii przetworzenia energii cieplnej na elektryczną,
- występowanie prawidłowości na ogół zmniejszania się wartości parametrów hydrogeologicznych skał z głębokością prowadzących do zmniejszania się wydajności otworów geotermalnych wpływający na wybór technologii przez Doktoranta,
- postęp techniczny i technologiczny w rozwiązaniach na rzecz konwersji energii cieplnej na energię elektryczną skłaniający do sprawdzenia i doboru technologii optymalnej dla naturalnych warunków w Polsce.

Jednocześnie podjęcie tematu pracy doktorskiej na polu, w którym brak jest w Polsce jakichkolwiek, poza teoretycznymi, doświadczeń praktycznych, przynajmniej częściowo wpisuje się w działania zmierzające do zapewnienia tej luki. Podjęcie zagadnień poruszanych w pracy Pana mgr inż. Michała Kaczmarczyka wpisuje się w dostrzeżony od niedawna trend oceny polskich warunków hydrogeotermalnych w aspekcie konwersji energii cieplnej wód geotermalnych na energię elektryczną. Wyniki pracy uważam za cenne i potrzebne, a także istotne i znaczące dla rozwoju nowoczesnej geotermii i praktycznego wykorzystania zasobów wód geotermalnych. Wysoko oceniam naukową i praktyczną wartość badań udokumentowanych w pracy, zwłaszcza z uwagi na:

- ✦ potrzebę możliwie najlepszej identyfikacji i charakterystyki warunków hydrogeotermalnych w nowym w Polsce kierunku wykorzystania energii cieplnej wód geotermalnych - w procesie konwersji na energię elektryczną,
- ✦ konieczność ustalenia liczby, zakresu i rodzaju nieprzypadkowych parametrów przydatnych dla oceny warunków hydrogeotermalnych oraz wskazywania obszarów perspektywicznych do bardziej szczegółowej analizy,
- ✦ konieczność ustalenia wartości kryterialnych wybranych parametrów w kierunku ich wykorzystania w procesie selekcji i wyznaczenia obszarów o potencjalnie dobrych warunkach naturalnych i infrastrukturalnych dla lokalizowania elektrowni geotermalnych, w tym dla oceny możliwości, zagrożeń i kosztów,
- ✦ metodykę analiz teoretycznych przyjętą w pracy doktorskiej, która układa się w pewien logiczny algorytm działań wstępnych wymagających mniejszych nakładów pracy i bezpiecznego poziomu nakładów finansowych przed podjęciem działań badawczych szczegółowych, a które w skrócie można przedstawić następująco:
 - analiza ogólna budowy geologicznej i warunków hydrogeotermalnych,
 - określenie możliwości zastosowania kryterialnych parametrów oceny,
 - zobrazowanie warunków termicznych badanego obszaru i implementacja do analizy wskazanych przez Doktoranta wartości parametrów kryterialnych,
 - wytypowanie obszarów perspektywicznych i prognoza temperatury oraz spodziewanej wydajności otworów geotermalnych,
 - testowanie energetycznych i sprawnościowych parametrów elektrowni z zastosowaniem różnych technologii - wg ORC i Cyklu Kaliny,
 - dobór optymalnej technologii konwersji energii cieplnej na elektryczną oraz wstępna ocena parametrów elektrowni.

Są to działania konieczne w preselekcji obszarów perspektywicznych oraz dla podjęcia następnych kroków, w tym: szczegółowej oceny lokalizacji potencjalnej inwestycji począwszy od oceny parametrów górotworu, procesów technologicznych, utylizacji wód po procesie konwersji energii, po ocenę możliwości technicznych i infrastrukturalnych na powierzchni, a następnie uwarunkowań prawnych, środowiskowych i ekonomicznych, które nie są przedmiotem badań prowadzonych w ramach pracy doktorskiej.

- ✦ dostępność i możliwość łatwej aplikacji wyników badań Doktoranta zwłaszcza w odniesieniu do zastosowania w innych rejonach (kryterialne wartości temperatury wód i wydajności otworu, algorytm ustalania parametrów elektrowni geotermalnej),
- ✦ wskazanie z zastosowaniem zaproponowanych kryteriów rejonów perspektywicznych dla rozwoju energetyki opartej na wodach geotermalnych w Małopolsce i w Polsce,
- ✦ wykonanie pionierskich w Polsce badań nad implementacją nowej technologii i wyników żmudnych obliczeń testowych dla różnych technologii konwersji energii cieplnej na elektryczną oraz jednoznaczne wskazanie najbardziej efektywnego sposobu z zastosowaniem technologii w Cyklu Kaliny,
- ✦ wykazanie możliwości wykorzystania energii cieplnej wód geotermalnych dla celów wytwarzania ciepła i elektryczności.

Za duże osiągnięcie Doktoranta uważam wykazanie słuszności ustalonych przez Niego kryterialnych wartości temperatury i wydajności wód z otworu geotermalnego oraz opracowanie i przetestowanie algorytmu wyboru technologii wraz z wykazaniem celowości zastosowania nowej technologii wg Cyklu Kaliny w warunkach polskich. Biorąc pod uwagę fakt, że w Polsce takich badań dotychczas nie wykonywano oraz, że nie ma doświadczeń w ocenie podstaw technologicznych wyboru lokalizacji perspektywicznej dla wytwarzania prądu elektrycznego wskutek konwersji energii cieplnej wód geotermalnych, wyniki prac Doktoranta mają w mojej opinii bardzo istotne znaczenie dla podejmowania dalszych czynności badawczych w kierunku wyboru a następnie wdrożenia takiej instalacji w Polsce. Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska stanowi dobrą podstawę do dalszych badań dotyczących zagadnień związanych z energetyką opartą na geotermii jako stabilnym źródle energii odnawialnej.

Pomimo, że w mojej opinii, treści zawarte w przedłożonej do recenzji pracy doktorskiej, stanowią istotny wkład w rozwój dyscypliny geologia, nasunęły mi się pewne uwagi krytyczne i sugestie, które wskazałem poniżej, a które nie umniejszają wartości merytorycznej recenzowanej pracy. Z chwilą przygotowywania tekstu dysertacji do opublikowania proponuję, aby je uwzględnić w manuskrypcie publikacji. Są to:

uwagi porządkowe

- 1) proponuję uporządkować treść rozdziałów literaturowych oraz numerację rozdziałów w pracy - dotyczy rozdziałów 2, 3 i 6,
- 2) proponuję połączenie podrozdziałów 2.2 i 2.3 w rozdział 2.2, a także za zbędne uważam wyodrębnienie rozdziałów 6.2 i 6.4, które można moim zdaniem połączyć,
- 3) dla rozdziału 2.1 i rys. 2.2 należy wyjaśnić lub wymienić, co się rozumie pod pojęciem "inne technologie" - informacja jest dopiero w rozdziale 3, a w tab. 2.1 - 2.6 należy skomentować pod tablicą, dlaczego w pozycji "produkcja" w wielu przypadkach występuje nieobjaśniony znak "-", czy oznacza to brak możliwości pozyskania danych, czy może zakończenie funkcjonowania lub inne,
- 4) proponuję likwidację numeracji rozdziałów - przykładów zastosowania w rozdz. 3, jako odrębnych numerów podrozdziałów kolejnego stopnia, niektóre się powtarzają,

uwagi do treści pracy

- 5) proponuję wykazać więcej determinacji dla uzasadnienia oraz stosowania i promowania w dysertacji dobrej propozycji terminologicznej proponowanej przez Doktoranta - "konwersja energii cieplnej na elektryczną" (na str. 6), pomimo "powszechnego stosowania w języku polskim" terminu mniej odpowiedniego,
- 6) w omówieniu elektrowni Neustadt-Glewe oraz pod tablicą 2,4 sugeruję zawrzeć szersze wyjaśnienie przyczyn demontażu turbiny i braku opłacalności produkcji - taka informacja da pogląd na czynniki, które mogą decydować o powodzeniu budowy instalacji w Polsce,

- 7) brak użycia i omówienia w pracy czynników - właściwości wód i cyklu chłodzenia, zwłaszcza przy typowaniu miejsc w Małopolsce, a które Doktorant opracował w rozdziale 3,
- 8) w rozdziale 4 należy ograniczyć opisy innych obszarów, które leżą poza obszarem badań Doktoranta i którymi Autor w sposób metodyczny się nie zajmuje, np. GZW i niecka miechowska, a także wskazane byłoby powołanie się przy omówieniu warunków termicznych w GZW na prace innych badaczy, np. z ośrodków śląskich,
- 9) należy żałować, że Doktorant nie pokusił się o próbę mapowego zilustrowania i wyznaczenia izolinii temperatury 74°C z uwzględnieniem minimalnej wydajności otworów geotermalnych, przyjętej i spodziewanej na podstawie obserwacji otworowych,
- 10) w rozdziale 6 należy wyeliminować powtórzenia w metodyce obliczeń termodynamicznych,
- 11) dla lepszego wyeksponowania wyników pracy sugeruję wyodrębnienie wniosków wynikających z pracy, a także wskazań w odniesieniu do dalszych kierunków badań proponowanych przez Doktoranta.

Podsumowanie

Doktorant, na podstawie przeprowadzonych studiów literaturowych dotyczących istniejących elektrowni geotermalnych i analizy warunków ich pracy określił główne kryteria determinujące sprawność i moc elektrowni geotermalnej. Na podstawie doświadczeń zagranicznych określił kryteria oceny wybranych czynników, jak temperatura wody i wydajność otworu geotermalnego, które następnie wykorzystał do przeprowadzenia charakterystyki i oceny obszaru swoich badań. Opracowując mapy tematyczne, określił rejony w obrębie województwa małopolskiego o największych perspektywach dla zlokalizowania elektrowni geotermalnej. Na podstawie rozpoznania wiertniczego i danych pochodzących z głębokich otworów na obszarze Małopolski ocenił rozkład termiki górotworu i wytypował obszary i otwory stwarzające perspektywy dla odzysku oraz konwersji energii cieplnej na elektryczną. Omówił metodyczne podstawy i zastosował w obliczeniach modele termodynamiczne Obiegu Organicznego Rankine'a ORC i w Cyklu Kaliny dokonując wielowariantowych obliczeń dla doboru parametrów procesu konwersji energii cieplnej na elektryczną dla różnych czynników roboczych, różnych warunków naturalnych, temperatury wody i jej wypływu z otworu geotermalnego, na podstawie których dla warunków Małopolski wyselekcjonował optymalny sposób wykorzystania energii geotermalnej, typując technologię wg Cyklu Kaliny, jako bardziej efektywną. Ponadto cenne jest opracowanie przez Doktoranta procedury doboru czynnika roboczego w technologiach ORC i Cyklu Kaliny oraz opracowanie metodyki postępowania przy wyborze rejonu perspektywicznego.

Bardzo ważnym dla praktyki jest wykazanie, że w obszarze badań Doktoranta, jako źródło przyszłego pozyskania energii dla celów produkcji energii elektrycznej mogą być rozpatrywane wody geotermalne, praktycznie na całym obszarze podhalańskiego systemu geotermalnego, jak również, że wskazał wartości dwóch uniwersalnych czynników oceny, jako wartości kryterialne dla określenia możliwości produkcji energii elektrycznej na bazie wód geotermalnych.

Bardzo ważnym rezultatem pracy doktorskiej jest wykazanie, że nowa technologia, tj. w Cyklu Kaliny jest perspektywiczna dla produkcji elektryczności z uwzględnieniem specyfiki warunków geotermalnych w Polsce. Osiągnięciem Doktoranta jest znaczący udział w opracowywaniu koncepcji energetycznego wykorzystania wód geotermalnych. Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska stanowi dobrą podstawę do dalszych badań dotyczących zagadnień związanych z energetycznym wykorzystaniem wód geotermalnych.

Rozprawa doktorska ma charakter naukowy i aplikacyjny, a po uzupełnieniu i rozszerzeniu zakresu badań może znaleźć zastosowanie w praktyce.


Wniosek końcowy

Praca doktorska mgr inż. Michała Kaczmarczyka pt.: "*Analiza i ocena możliwości produkcji energii elektrycznej przy wykorzystaniu energii cieplnej zakumulowanej w wodach geotermalnych na obszarze województwa małopolskiego*" dotyczy nie tylko ważnego problemu zagospodarowania potencjału geotermalnego wód podziemnych na terenie Małopolski, ale także ma charakter poznawczy i metodyczny zwłaszcza w odniesieniu do energetycznego wykorzystania wód geotermalnych o niskiej entalpii. Ma także znaczenie praktyczne dla metodyki i prowadzenia badań nad jak najlepszym wyborem lokalizacji ewentualnych przedsięwzięć energetycznych na bazie wód geotermalnych.

Stąd po zapoznaniu się z treścią dysertacji oraz w nawiązaniu do wymagań wynikających z obowiązujących przepisów uważam, że praca doktorska przedstawiona przez mgr inż. Michała Kaczmarczyka jest wartościową pracą naukową i stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego postawionego przez Doktoranta w obszarze dyscypliny naukowej *geologia*. Rozprawa doktorska w stopniu wystarczającym świadczy o ogólnej wiedzy teoretycznej Doktoranta, a także o umiejętności samodzielnego prowadzenia przez Niego pracy naukowej w tej dyscyplinie.

Stwierdzam, że przedłożona mi do recenzji rozprawa doktorska autorstwa Pana mgr inż. Michała Kaczmarczyka spełnia wymagania ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65. Poz. 595 z późniejszymi zmianami). Stwierdzenie to upoważnia mnie do przedstawienia Wysokiej Radzie Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie wniosku o dopuszczenie Pana mgr inż. Michała Kaczmarczyka do publicznej dyskusji nad rozprawą doktorską.

W nawiązaniu do przedstawionej wcześniej oceny walorów pracy i wysoko oceniając rozprawę doktorską Pana mgr inż. Michała Kaczmarczyka, wnioskuję do Wysokiej Rady Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska o jej wyróżnienie, jednocześnie zastrzegając, że nie mam wiedzy na temat wypełnienia przez Doktoranta wymagań wynikających z uchwały Rady Wydziału GGiOŚ AGH z dnia 4 lipca 2016 r. w sprawie wyróżniania prac doktorskich.



.....
Przemysław Bukowski