

Kraków, 10.09.2015 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 Pani mgr Marty Wiśniewskiej
pt. „Znaczenie warunków geologicznych dla możliwości poboru energii niskiej
entalpii przez pionowe gruntowe wymienniki ciepła (na obszarze Łodzi)”

1. Charakterystyka formalna rozprawy

Recenzja została wykonana na zlecenie Dziekana Wydziału Nauk Geograficznych Uniwersytetu Łódzkiego z dnia 25.06.2015 r. Promotorem Rozprawy jest Pan dr hab. Jacek Forysiak, prof. UŁ, a promotorem pomocniczym Pan dr inż. Marek Wojciechowski. Praca została wykonana w Katedrze Geomorfologii i Paleogeografii Uniwersytetu Łódzkiego.

Rozprawa zawiera 161 stron tekstu, na który składa się 7 rozdziałów (w których znajduje się 11 tabel i 44 ryciny), 15 stron spisu literatury (194 pozycji, w tym 105 polskich i 89 obcojęzycznych), 4 stron spisów rycin, tabel, załączników. Po tekście zamieszczone są załączniki: 3 mapy, 18 przekrojów, 2 szczegółowe opisy i zestawienia tekstowe.

Układ pracy jest przejrzysty, a jej struktura poprawna. Rozdział 1 zawiera wprowadzenie w zasadniczą tematykę Rozprawy, przedstawia jej cele, teren i metodykę badań, a także uzasadnia podjętą tematykę. Rozdziały 2 i 3 zawierają omówienie ogólnych aspektów technicznych związanych z wykonywaniem i eksploatacją otworowych wymienników ciepła, rodzajem i parametrami źródeł ciepła dla tych wymienników, w nawiązaniu do sytuacji w Łodzi – terenie badań Autorki. Zasadnicze dla Rozprawy są rozdziały 4-6, w których przedstawione są wyniki własnych badań, analiz i prac Doktorantki, natomiast rozdział 7 zawiera Podsumowanie i wnioski końcowe.

Praca jest nowatorska, wpisując się w rozwijający się w Polsce od stosunkowo niedawna nurt badań dotyczących aspektów termicznych środowiska geologicznego jako źródła pozyskiwania energii przez gruntowe wymienniki ciepła – kluczowe elementy pomp ciepła (jednych z bardziej perspektywicznych technologii w grupie odnawialnych źródeł energii).

2. Omówienie Rozprawy

Rozdział 1 „Wstęp” jest wprowadzeniem w zasadniczą tematykę pracy – pionowych gruntowych wymienników ciepła (określanych w dalszej części tego tekstu jako PGWC), jak i pomp ciepła (PC) bazujących na płytkich partiach górotworu jako źródłach ciepła pozyskiwanego za pomocą takich wymienników. Autorka słusznie podkreśla znaczenie uwarunkowań i czynników geologicznych dla prawidłowego projektowania zarówno samych PGWC jak i instalacji PC, właściwego określania / szacowania parametrów cieplnych tych ośrodków, jak i osiągania zakładanych wydajności i mocy cieplnych (co odgrywa istotną rolę ze względów technologicznych, energetycznych i ekonomicznych).

Doktorantka podaje też cel Rozprawy, obszar i zastosowaną metodykę badań, uzasadnia podjętą tematykę poprzez przybliżenie obecnych uwarunkowań stosowania gruntowych wymienników ciepła w rejonie Łodzi w świetle dotychczasowych projektów i ogólnopolskich przepisów prawnych w tym zakresie i wskazanie na istotne braki i potrzeby w tym zakresie.

Celem badań była analiza warunków geologicznych: rodzaju, zróżnicowania stopnia złożoności podłoża Łodzi (rozumianego jako utwory czwartorzędowe, trzeciorzędowe i stropowe partie serii kredowych i w ten sposób traktowanego w niniejszej recenzji) dla potrzeb określenia szacunkowych wartości przewodności cieplnej tego podłoża λ [W/(m*K)] oraz możliwych do uzyskania jednostkowych wydajności cieplnych q_v [W/m] z pojedynczego PGWC o mocy poniżej 30 kW i czasie pracy 2000 h/rok. Przyjęto kilka celów szczegółowych:

- przybliżenie metody pozyskiwania energii cieplnej z górotworu za pomocą technologii PGWC,
- przedstawienie warunków geologicznych Łodzi oraz omówienie istotnych elementów środowiskowych wpływających na możliwości wykorzystania instalacji grzewczych bazujących na PGWC,
- analizę realizowanych instalacji na podstawie projektów robót geologicznych na wykonanie otworów wiertniczych na potrzeby wykorzystania ciepła Ziemi, jakie były zatwierdzone przez Urząd Miasta w Łodzi w 2011-2014,
- określenie i przestrzenne zilustrowanie szacunkowych wartości przewodności cieplnej w zróżnicowanych warunkach geologicznych podłoża Łodzi (dla otworów o głębokości 50 m, 75 m i 100 m,
- przeprowadzenie szacunkowych analiz wydajności cieplnej PGWC na terenie Łodzi dla ich wybranych długości (50, 75, 100 m).

Obszar badań obejmował teren Łodzi. Autorka wskazuje na jego szczególne położenie pod względem geomorfologicznym: w podprovincji Nizin Środkowopolskich, jednak o charakterze przejściowym pomiędzy wyżynami i Nizem Polskim, na pograniczu dwóch makroregionów: Wzniesień Łódzkich i Niziny Południowowielkopolskiej. Również pod względem geologicznym miasto położone jest w szczególnym miejscu – na styku synklinorium szczecińsko-łódzko-miechowskiego i antyklinorium środkowopolskiego. Obszar cechuje miększa pokrywa utworów czwartorzędowych (w tym związanych z maksymalnymi zasięgami zlodowaceń środkowopolskich) i czwartorzędowy charakter rzeźby, a ponadto – odmienna od Nizu Polskiego ewolucja tej rzeźby podczas całego kenozoiku. Jak słusznie zauważa Autorka, zarówno czynniki geologiczne, jak i geomorfologiczne i ich efekty w postaci dużej zmienności litologicznej i miąższości utworów budujących podłoże Łodzi (zwłaszcza czwartorzędowych), jak też dużego zróżnicowania morfologii i głębokości zalegania podłoża podczwartorzędowego, mają podstawowe znaczenie dla dużego zróżnicowania wartości parametrów cieplnych górotworu jako dolnego źródła dla PGWC.

Podstawowa teza pracy, która przewija się w tle wielu rozważań i stwierdzeń Autorki zakłada, że w skałach podłoża Łodzi zakumulowana jest energia geotermalna niskiej entalpii możliwa do wykorzystania za pomocą instalacji GPWC. Ilość tej energii jest zmienna i uzależniona od niejednorodnych lokalnych warunków geologicznych i hydrogeologicznych. Zróżnicowana budowa geologiczna implikuje znaczne różnice w przewodności cieplnej skał podłoża oraz w możliwych do uzyskania wartościach jednostkowych wydajności cieplnych q_v PGWC w poszczególnych częściach miasta. Autorka dążyła zatem do jak najbardziej szczegółowego ukazania warunków geologicznych i ich wpływu na ilość ciepła zakumulowaną w podłożu Łodzi możliwą do odzyskania za pomocą PGWC (czego efektem było m.in. jednoznaczne udowodnienie założonej tezy).

Jak podaje Doktorantka, podstawowym materiałem badawczym były archiwalne profile 1325 otworów wiertniczych (spośród ponad 2000) wykonanych w rejonie Łodzi w okresie ponad 100 lat: 1900–2004. Większość z nich (1298 – 98%) nie przekroczyła głębokości 300 m. Autorka sporządziła dla nich komputerową bazę danych, która posłużyła do wykonania map tematycznych, przekrojów geologicznych i in. zasadniczych badań i analiz. Korzystała też z publikowanych arkuszy Szczegółowej Mapy Hydrogeologicznej i Mapy Geologicznej Polski dla Łodzi, map z innych opracowań, w tym Atlasu geologiczno-inżynierskiego aglomeracji łódzkiej, Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego miasta Łodzi, a także map z Atlasu zasobów geotermalnych formacji mezozoicznych na Nizu Polskim. Przeanalizowała również realizowane instalacje PGWC wykonane na podstawie 37 projektów robót geologicznych na wykonanie otworów wiertniczych na potrzeby wykorzystania ciepła Ziemi, jakie były zatwierdzone przez Urząd Miasta Łodzi w 2011–2014 r. Przeprowadziła także obszernie studia literaturowe publikacji zagranicznych (głównie anglojęzycznych) i polskich, odpowiednio je stosując i interpretując jako tło naukowe dla opracowywanej problematyki (stosunkowo „młodej” w warunkach polskich, a w ujęciu zastosowanym przez Autorkę – podjętej jako jedna z pierwszych w kraju).

Autorka zastosowała kameralne *metody badań*, jako najbardziej odpowiednie dla realizacji tematu i rodzaju danych wyjściowych. Korzystała m.in. z metod statystycznych, a także programów komputerowych (GeoStar, GeoPlan, CorelDRAW, Inkscape 0.91). Wymaga podkreślenia, że obliczenia współczynników cieplnych Doktorantka prowadziła przy uwzględnieniu zaleceń i norm obowiązujących już w innych krajach (m.in. w Niemczech) wytycznych odnośnie prawidłowego projektowania i wykonywania PGWC i instalacji PC, a także zaleceń opracowanych w 2013 r. dla warunków polskich (Mirowski [red.] i in., 2013). Uzyskała dzięki temu bardziej wiarygodne wyniki w porównaniu z wcześniejszym podejściem innych autorów, bazującym na przyjmowaniu do obliczeń dowolnych i uproszczonych wartości. Wskazała także na konieczność wprowadzania zaleceń ww. wytycznych do szerszego stosowania w Polsce.

Zdaniem recenzentki warto było bardziej dobitnie wskazać na zakres badań, obliczeń, analiz, itp. wykonanych przez Doktorantkę (tym bardziej, że były one obszerne, nowatorskie i są podstawą Rozprawy, osiągniętego celu i istotnych rezultatów). Rozdział ten można byłoby też uzupełnić o ogólnie przyjęte definicje wód i energii geotermalnej stosowane w praktyce międzynarodowej (oprócz określeń podanych w ślad za używanymi przez niektórych autorów polskich).

Rozdział 2 „Warunki techniczne pozyskiwania i wykorzystania ciepła niskotemperaturowego Ziemi za pomocą pionowych gruntowych wymienników ciepła” został opracowany na podstawie odpowiednio dobranej literatury przedmiotu z uwzględnieniem publikacji wiodących specjalistów z branży, a także z odwołaniem do wspomnianych wcześniej norm i wytycznych, dyrektyw i in. przepisów.

Autorka przedstawia w szczególności: Zasadę działania gruntowych pomp ciepła i PGWC; Metody wiercenia, uszczelnienia i instalacji [PGWC]; Sposoby mierzenia wydajności systemu opartego o PGWC. Metody pomiarowe – test TRT [odpowiedzi termicznej]; Lokalny wpływ instalacji z PGWC na środowisko; Czynniki decydujące o optymalnej pracy PGWC. Są to podstawowe aspekty, na które powinno zwracać się szczególną uwagę podczas projektowania PGWC, jednak dotychczas na ogół niewystarczająco uwzględniane w praktyce, tym bardziej zatem ważne jest wskazanie na ich rolę. Rozważania poparte są syntetycznym ujęciem w formie tabel (tabele 3–4, s. 47).

Z uwagi na temat Rozprawy Doktorantka podkreśliła znaczenie znajomości warunków geologicznych i hydrogeologicznych podłoża dla sposobu wykonania PGWC, optymalnego doboru jego konstrukcji i wieloletniej pracy instalacji PC, a także ich kosztów. Dotyczy to zwłaszcza parametrów cieplnych, co jest warunkiem właściwego określenia mocy takich wymienników i całej instalacji PC przy uniknięciu niewłaściwego oszacowania mocy i ciepła z układu w porównaniu z zapotrzebowaniem odbiorcy (co nierzadko ma miejsce w dotychczasowej praktyce, jak wynika z analizy kilkudziesięciu projektów na wykorzystanie ciepła z Ziemi (<30 kW) w obszarze Łodzi).

Doktorantka podaje także sposób badania *in situ* i określania rzeczywistych wartości parametrów cieplnych górotworu, jakim jest test reakcji termicznej (TRT) i rozłożony test TRT (DTRT). Metodę TRT zastosowała w badaniach na terenie Łodzi, w których uczestniczyła (co jest także przedmiotem odrębnej publikacji). Autorka postuluje także, że zarówno ze względów poznawczych, jak i praktycznych, wymienione metody powinny jak najszybciej wejść do powszechnej praktyki w Polsce, zwłaszcza że przy obserwowanym rozwoju pomp ciepła bazujących m.in. na PGWC przyjmowanie w założeniach projektowych nietrafnych wartości parametrów skutkuje niekiedy i może skutkować ryzykiem niewłaściwie dobranych i pracujących instalacji.

Dodatkowym walorem tego rozdziału byłoby jego uzupełnienie o schemat podstawowych elementów pomp ciepła z PGWC, a także podanie ewent. algorytmu / formuły wyznaczania wartości parametrów cieplnych górotworu na podstawie testu TRT.

Rozdział 3 „Źródła ciepła niskiej entalpii dostępne dla gruntowych pionowych wymienników ciepła” zawiera stosunkowo obszerne omówienia pochodzenia, transportu ciepła i parametrów cieplnych górotworu – istotnych zagadnień ogólnych, które są naukową podbudową dla zasadniczego przedmiotu badań i dociekań Autorki. Ujęte są one jako nast. kwestie: Procesy termiczne w ośrodku skalnym związane z czynnikami klimatycznymi; Gradient geotermiczny i strumień cieplny Ziemi; Parametry termiczne ośrodka skalnego.

Doktorantka poświęca sporo miejsca m.in. wpływowi zlodowaceń na kształtowanie temperatur wglębnych (do ok. 2–2,5 km p.p.t.) opisywanemu dla warunków polskich przez kilku autorów. Jest to interesujący aspekt, natomiast, według recenzentki, współczesne pole cieplne jest już wypadkową kilku elementów składowych, w tym także zlodowaceń, natomiast z punktu widzenia PGWC propagacja zmian termicznych implikowanych zlodowaceniami jest zbyt wolna, aby istotnie wpływać na warunki, w jakich działają takie wymienniki, których okres pracy wynosi do ok. 25 lat. Niektóre szczegóły można by zatem pominąć bez uszczerbku dla pracy. Ważniejsza jest w tym kontekście wskazywana przez Autorkę zmienność temperatur przypowierzchniowych partii górotworu związana z wahaniami natężenia promieniowania słonecznego, które zaznaczają się już w cyklach dobowych czy też sezonowych.

Na szerszym tle Doktorantka przedstawia warunki geologiczne i geotermalne rejonu Łodzi (rozdz. 3.2). Zdaniem recenzentki (nieco odmiennym od zdania Autorki) cechują się one jednak nieco korzystniejszymi wartościami strumienia ciepłego Ziemi ($70\text{--}75 \text{ mW/m}^2$) niż średnie dla Niżu Polski ($40\text{--}50 \text{ mW/m}^2$), do którego należy ten rejon.

W odrębnym podrozdziale 3.3 omówione są, zasadnicze dla prowadzonych przez Autorkę badań, parametry cieplne górotworu jako źródła dla PGWC: przewodności, pojemności cieplne. Także w tym względzie podkreślona jest rola naturalnych czynników geologicznych w kształtowaniu ich wartości i zmienności (typ litologiczny, skład mineralogiczny, wilgotność). Doktorantka zestawiała też w tabelach wartości tych parametrów według różnych źródeł literaturowych (tab. 5–6, s. 60–61) z których wynika, że nawet dla tego samego typu skał można przyjmować różne wielkości. Tym bardziej zatem należy starać się o ich prawidłowe określenie oddające rzeczywiste wartości dla konkretnej rozpatrywanej sytuacji przede wszystkim na podstawie badań *in situ* (testu TRT).

Kolejne rozdziały 4–6 zostały opracowane przede wszystkim na podstawie własnych badań, prac i analiz Autorki i są zasadnicze dla Rozprawy.

Rozdział 4 „Geologiczne i hydrogeologiczne uwarunkowania pozyskiwania niskotemperaturowego ciepła z Ziemi na terenie Łodzi” naświetla główne elementy wglębnej budowy, a także różnorodne procesy (ruchy tektoniczne, halokinezę, a zwłaszcza wietrzenie, denudację, erozję osadów i specyficzne procesy związane ze zlodowaceniami (zaburzenia glacytektoniczne i neotektonikę), które ukształtowały współczesny obraz litologiczny, tektoniczny i geomorfologiczny podłoża, w tym zróżnicowanie miąższości i zasięgów obocznych utworów, warunków hydrogeologicznych, ukształtowania powierzchni mezozoicznej i podczwartorzędowej. Zagadnienia te zawiera rozdział 4.1 „Środowisko skalne jako dolne źródło ciepła – zarys budowy geologicznej obszaru [badań]” i rozdział 4.2 „Warunki hydrogeologiczne na terenie Łodzi”. W efekcie omówionych procesów i uwarunkowań rejon miasta cechuje duże zróżnicowanie podłoża, co implikuje duże zróżnicowanie jego parametrów termicznych. Omawiają warunki hydrogeologiczne Doktorantka skupia się na aspektach, które mają duże znaczenie dla PGWC – zawodnieniu utworów kenozoicznych i kredowych (co poprawia ich parametry cieplne).

Na tak przygotowanym tle Autorka przedstawia litologię i zróżnicowanie przestrzenne utworów nawiercanych w podłożu Łodzi (rozdz. 4.3) zgodnie z obrazem uzyskanym dzięki mapom ścięcia podłoża dla głębokości 30, 50 i 100 m p.p.t (rozdz. 4.3.1), 18 przekrojom i szczegółowym opisom litologicznym profili otworów archiwalnych (rozdz. 4.3.2). Materiały te (zamieszczone jako załączniki do głównego tekstu) Doktorantka opracowała na podstawie danych z 1325 archiwalnych profili otworów wiertniczych w przypadku map i z 439 otworów w przypadku przekrojów.

Te ważne mapy i przekroje dają wgląd w obraz skomplikowanej sytuacji wglębnej omawianego rejonu w odniesieniu do utworów Q, Tr, i kredowych. Są one bardzo przekonującym dowodem dużego zróżnicowania podłoża jako dolnego źródła dla PGWC (uderzająca jest m.in. jego swoista „mozaikowość” na mapach ścięcia) i wynikającej stąd konieczności uwzględniania tego faktu dla prawidłowej lokalizacji i projektowania takich wymienników.

Materiały te mają duże znaczenie poznawcze, a także praktyczne (będąc istotnymi osiągnięciami Doktorantki, wykonanymi po raz pierwszy w takim ujęciu dla Łodzi). Są starannie omówione, z odniesieniem do dzielnic i osiedli Łodzi, co ułatwi korzystanie z nich w celach projektowych PGWC. Były też punktem wyjścia do następnego etapu badań Autorki – wyznaczenia wartości zasadniczych parametrów cieplnych podłoża, wykonania map tematycznych, analiz statystycznych, itd. (omówionych w rozdziałach 5 i 6).

W tym Rozdziale przydatny byłby (jako ilustracja do opisu tekstowego) przynajmniej schematyczny przekrój ogólny ilustrujący tekstowy opis powierzchni podkenozoicznej Łodzi (zaczepnięty z literatury, jaką cytuje Autorka).

Rozdział 5 „Wartości współczynnika przewodzenia ciepła utworów geologicznych oraz jednostkowe wydajności cieplne pionowych GWC w archiwalnych profilach wiertniczych z obszaru Łodzi” jest najbardziej obszernym pod względem zarówno treści merytorycznych, jak i objętości (s. 87–121), w logicznym następstwie i na podbudowie poprzednich rozdziałów. Przedstawia wyniki obliczeń i innych prac własnych Doktorantki, ich analizę i interpretację na szerokim tle uwarunkowań geologicznych i zróżnicowania litologicznego podłoża Łodzi.

Jest to kolejny ważny naukowo i praktycznie fragment Rozprawy, świadczący także o dobrym rozeznaniu przez Autorkę zagadnień dotyczących GWC, w tym znaczenia czynników geologicznych zarówno w ujęciu ogólnym, jak i w odniesieniu do obszaru badań.

Na początku (rozdz. 5.1) Doktorantka podaje i uzasadnia założenia do wyznaczania wartości współczynnika przewodzenia ciepła λ oraz jednostkowej wydajności cieplnej q_v dla utworów rozpoznanych w 838 profilach archiwalnych wierceń (do głębokości ok. 1000 m). Dyskutuje także zalety i ograniczenia zastosowanego (racjonalnego) podejścia, wynikające przede wszystkim z bardzo dużej zmienności litologicznej i wewnętrznej niejednorodności serii skalnych podłoża.

Autorka wykonała obliczenia zgodnie z wprowadzanymi od niedawna w Polsce „Wytycznymi projektowania, wykonania i odbioru instalacji z pompami ciepła, część I” (Mirowski [red.] i in., 2013), normą niemiecką VDI 4640 i zalecanymi przez nie wartościami współczynników λ i q_v . Podaje też zestawienie tabelaryczne współczynnika λ i wykres do wyznaczania wartości współczynnika q_v w funkcji λ (s. 88–89). Warto jeszcze raz podkreślić przyjęcie przez Doktorantkę do obliczeń wartości zalecanych i „bezpiecznych”, zbliżonych do oznaczanych laboratoryjnie minimalnych wartości dla różnych rodzajów gruntów i skał (s. 88). Takie wyważone podejście i znajomość sytuacji litologicznej pozwoliły na otrzymanie w wyniku obliczeń minimalnych uśrednionych wartości q_v , a zatem – nieprzeszacowanie tego parametru, podstawowego zarówno z punktu widzenia poznawczego, jak i dla projektowania PGWC oraz instalacji PCa tak, aby spełniały zapotrzebowanie na moc i ciepło ze strony użytkownika i były ekonomicznie uzasadnione (co często nie ma miejsca w praktyce, o czym Autorka przekonała się analizując (przywoływane już) projekty na wykonanie PGWC). Słusznie zatem stwierdziła po szczegółowym opisanu skutków (energetycznych, technicznych, ekonomicznych) różnych wariantów niewłaściwego projektowania wymienników i doboru instalacji pomp ciepła (s. 91–94), że *„... tak istotnym elementem podczas planowania instalacji z gruntowymi pompami ciepła, w szczególności w obszarze, gdzie dominują w podłożu zróżnicowane warunki, jest rzetelnie wykonany projekt robót geologicznych, opierający się o jak najbardziej precyzyjną analizę lokalnych warunków geologicznych i hydrogeologicznych”* (w domyśle: decydujących o zróżnicowaniu i wartościach parametrów cieplnych podłoża).

Przydatne byłoby uzupełnienie ww. rozważań o formuły obliczeń omawianych parametrów cieplnych (choćaby w formie załącznika, aby utrzymać zwartość tekstu głównego, gdzie podany jest ogólny wzór) i o tabelę dla syntetycznego zestawienia skutków energetycznych różnych wariantów niewłaściwego projektowania PGWC i doboru instalacji PC rozpatrywanych na stronach 1–94.

Obliczone wartości średnie współczynników λ i q_v były podstawą sporządzenia przez Doktorantkę schematycznych map ukazujących ich rozkład przestrzenny dla przyjętych głębokości GWC 50, 75 i 100 m i mocy cieplnej (poniżej 30 kW), czyli – szacunkowych warunków dla pionowych GWC (s. 90). Wygenerowane zostały w oprogramowaniu matplotlib metodą interpolacji liniowej. Te wykonane po raz pierwszy mapy (ważne osiągnięcie Autorki) umożliwiają wgląd w warunki termiczne podłoża Łodzi i przekonują o dużej zmienności (lateralnej i głębokościowej) analizowanych parametrów, jako następstwo uwarunkowań geologicznych. Mapy są interesująco omówione, ze zwróceniem uwagi na różnorodne implikacje, jakie wynikają lub mogą wynikać z niewystarczającej (lub braku) znajomości wielkości i rozkładu przestrzennego tych parametrów na projektowanie GWC i instalacji pomp ciepła, jak i kluczowe aspekty energetyczne, ekonomiczne, itp.

W rozdziale 5.2 Doktorantka przedstawia krytyczną ocenę znaczenia warunków podłoża Łodzi dla PGWC – na podstawie analizy zbioru wartości λ i q_v , 18 przekrojów geologicznych / litologicznych i map szacunkowych średnich wartości λ dla PGWC o głębokościach 50, 75 i 100 m i z odniesieniem do zróżnicowania litologicznego utworów czwartorzędowych, trzeciorzędowych i kredowych, a także ich zawodnienia i własności cieplnych. Wskazuje m.in. na najbardziej i najmniej korzystne dla PGWC (pod względem energetycznym) fragmenty podłoża w przypadku ww. utworów, przy czym jako najbardziej korzystne podaje utwory kredowe (które jednak występują najgłębiej spośród rozważanych utworów (z czym wiąże się konieczność wykonywania głębszych PGWC).

Istotnym, obok ww. map, jest także syntetyczne zestawienie tabelaryczne (tab. 10, s. 96–98), które podaje uogólnione warunki dla PGWC w rejonie Łodzi, jakie wiążą się z poszczególnymi typami litologicznymi gruntu i skał podłoża, ich zawodnieniem i parametrami cieplnymi.

Oszacowane średnie wartości przewodności cieplnej i mapy ich rozkładu przestrzennego posłużyły Autorce do obliczenia i oceny jednostkowych wydajności cieplnych PGWC na terenie Łodzi (rozdz. 5.3), sporządzenia map rozkładu tego parametru dla założonych głębokości tych wymienników 50, 75 i 100 m (analogicznie jak w przypadku przewodności cieplnej), a następnie analizy jakościowej i ilościowej (z elementami statystyki) uzyskanego zbioru wartości i rozkładu tego najważniejszego parametru dla PGWC. Zwraca uwagę na wzrost jego wartości z głębokością, co odpowiednio uzasadnia czynnikami geologicznymi i hydrogeologicznymi. Jest to także przesłanka dla celów projektowych (analogicznie jak w przypadku wartości λ).

Wskazane byłoby uzupełnienie ww. rozważań o formuły obliczeń jednostkowej pojemności cieplnej (uwaga analogiczna jak w przypadku przewodności cieplnej). Interesujące byłoby ponadto graficzne pokazanie obliczonych uśrednionych temperatur górotworu przynajmniej dla wybranych profili otworów wiertniczych z rejonu Łodzi, a także porównanie zgodności wartości wcześniej przyjętych i wyznaczonych z testu TRT parametrów cieplnych podłoża dla potrzeb GWC. Nasuwa się też pytanie, czy Autorka miała możliwość porównania (np. dzięki dokumentacjom powykonawczym) zgodności parametrów zakładanych na etapie projektowania z uzyskanymi (po realizacji PGWC).

Rozdział 6 przedstawia możliwości poboru za pomocą PGWC energii niskiej entalpii zgromadzonej w podłożu Łodzi. Autorka opracowała go na podstawie wyników analizy statystycznej zbioru wartości obliczonych parametrów cieplnych, głównie wydajności jednostkowej (szczegółowo opisanych w poprzednich rozdziałach, zwłaszcza rozdz. 5) w ujęciu głębokościowym oraz przestrzennym. Stwierdza (udowadniając słuszność przyjętej tezy Rozprawy), że „energia cieplna zgromadzona w utworach geologicznych w podłożu Łodzi może być wykorzystywana za pomocą gruntowych pomp ciepła”. Jednak, jak podkreśla w poprzednim rozdziale, „potencjalne warunki jej wykorzystania na terenie miasta są silnie zróżnicowane” (s. 122). To stwierdzenie szeroko uzasadnia, tym razem na podstawie obliczeń statystycznych: zróżnicowania median wartości g_v dla głębokości GWC 50, 75, 100 m i na mapach ich przestrzennego rozkładu (ryc. 42–44, s. 125–127) – kolejnego ważnego osiągnięcia Doktorantki, a także innych podstawowych wskaźników statystycznych i udziałów procentowych wydzielonych klas wartości g_v (tab. 41, s. 123). Materiały te zawierają istotne informacje, wskazując m.in. na najmniej i najbardziej korzystne i „stabilne” rejony dla pozyskiwania energii cieplnej za pomocą PGWC i uzyskiwania wyższych od przeciętnych wartości g_v . Towarzyszy im szczegółowy opis i wyjaśnienia przyczyn zaobserwowanej zmienności, do których kluczem jest znajomość przez Autorkę zróżnicowania litologicznego i warunków wodnych skał podłoża (czynników sprawczych i argumentów wyjaśniających niemal wszystkie obserwacje i uzyskane wyniki). W tym drugim przypadku podkreśla nie tylko znaczenie naturalnych czynników hydrogeologicznych, ale także niekorzystnego wpływu antropogenicznych (nadmiernego poboru wód dla przemysłu włókienniczego i dla celów pitnych /w przeszłości/), co spowodowało powstanie bardzo dużego leja depresji w niecce łódzkiej i spadek zawodnienia niektórych utworów. Wskazuje jednocześnie na obserwowaną odbudowę poziomu wód podziemnych, co za kilku – kilkanaście lat powinno lokalnie przynieść także poprawę wartości g_v , istotną dla rozważanych wymienników.

W **Rozdziale 7** Autorka zawarła podsumowanie i wnioski końcowe z wyników najważniejszych obliczeń, prac i analiz przedstawionych szczegółowo w poprzednich częściach Rozprawy, w tym przekrojów geologicznych, map ściecia, wartości parametrów cieplnych podłoża łodzi istotnych z punktu widzenia PGWC. Podkreśla ich ścisłe powiązanie ze zróżnicowaniem warunków geologicznych (co było tematem i podstawową tezą pracy) i wskazuje jednocześnie zarówno na aspekty poznawcze, jak i praktyczne wyników, uwypuklając ich znaczenie dla odpowiedniego (ostrożnego) przyjmowania parametrów cieplnych (nawet nieco niższych niż zalecane przez wytyczne polskie i niemieckie), prawidłowego doboru rodzaju układów i projektowania PGWC (jak założono – o mocy do 30 kW_t i czasie pracy 2000 h/r) oraz bazujących na nich instalacji pomp ciepła w każdej indywidualnej sytuacji i w różnych rejonach miasta (które posiada perspektywy dla tych instalacji, chociaż zróżnicowane). Tym bardziej, że to charakteryzuje się ono wyjątkową zmiennością podłoża, co tak dobitnie wykazała Doktorantka, a wystarczającej wiedzy i świadomości tego faktu nie posiada jeszcze wielu specjalistów i projektantów z branży PC. Branżą ta jest przedmiotem coraz większego zainteresowania i rozwoju, zatem dostarczenie odpowiednich informacji i propozycji (w tym opracowanych przez Autorkę) jest kluczowe dla jej optymalnego rozwoju, z uniknięciem zarówno nadmiernych oczekiwań, jak i błędów, z towarzyszącymi im wieloma skutkami.

Autorka kończy stwierdzeniem, że zgodnie z Jej wiedzą „... *analizy i obliczenia wykonane w ramach pracy są obecnie najpełniejszym (jedynym) studium uwarunkowań geologicznych dotyczących projektowania pionowych GWC na terenie Łodzi. Wstępna, przybliżona ocena warunków dla planowanych do wykonania instalacji na terenie miasta może opierać się na przedstawionych wynikach*”. Jest to prawdziwa i przekonująca konstatacja i należy oczekiwać, że taką rolę Rozprawa spełni, dzięki zarówno swym walorom poznawczym, jak i praktycznym.

3. Ocena pracy, uwagi krytyczne i dyskusyjne

Rozprawa doktorska Pani mgr Marty Wiśniewskiej ma dużą wartość naukową i poznawczą oraz istotne znaczenie aplikacyjne. Stanowi oryginalne rozwiązanie problemu badawczego. Jest nowatorska, wpisując się w rozwijający się w Polsce od stosunkowo niedawna nurt badań dotyczących aspektów termicznych podziemnego środowiska geologicznego jako źródła pozyskiwania energii przez gruntowe wymienniki ciepła – kluczowe elementy pomp ciepła. Instalacje te (dynamicznie rozwijające się w wielu krajach) są od kilku lat przedmiotem rosnącego zainteresowania i rozwoju także w Polsce, stąd też bardzo ważna jest coraz lepsza znajomość zarówno warunków wglębnych (w tym zróżnicowania litologicznego), jak i wartości parametrów cieplnych ośrodków stanowiących źródła ciepła dla GWC dla ich prawidłowego projektowania i niezawodnej pracy.

Te zagadnienia były w centrum badań Doktorantki, która wykonała je dla obszaru Łodzi, z czym wiązały się spore wyzwania z uwagi na duże zróżnicowanie geologiczne podłoża tego miasta – źródła ciepła dla PGWC. Tym wyzwaniom dobrze sprostała, przygotowując pracę w sposób świadczący o umiejętności prowadzenia pracy naukowej i prezentacji wyników, z wykorzystaniem obszernego zestawu archiwalnych materiałów wyjściowych, w tym zwłaszcza profili otworów wiertniczych, przy krytycznym i wyważonym podejściu.

Praca przyczyniła się do dalszego poznawania warunków geologicznych i geotermicznych rejonu Łodzi. Dzięki niej jedno z największych miast w Polsce (o dużym potencjale dla rozwoju pomp ciepła z uwagi m.in. na konieczność ograniczania niskiej emisji związanej z ciepłownictwem i chłodnictwem) będzie posiadać, jako pierwsze w kraju, stosunkowo dobre rozpoznanie warunków i zasobów geotermalnych zarówno płytszych partii podłoża – właśnie dzięki omawianej Rozprawie – jak i głębszych (dzięki innym opracowaniom).

Fragmenty pracy są ponadto odpowiednim materiałem dla odrębnego informatora dla inwestorów, projektantów PGWC i instalacji pomp ciepła, którym zainteresowanie powinny wyrazić także organizacje branżowe i właściwe organa administracyjne.

Biorąc pod uwagę podstawowe aspekty i wymogi, jakie powinna spełniać rozprawa doktorska, należy stwierdzić, że wybór tematu był trafny, a sformułowanie hipotez i problemów badawczych, zastosowane metody badań – właściwe. Uzyskane wyniki są podstawą interesującej i oryginalnej pracy naukowej. Są one przedstawione w sposób przekonujący i jasny, świadczący o dobrym opanowaniu warsztatu badawczego, zastosowanych metod, a także wiedzy i pasji badawczej Autorki.

Rozprawa jest stosunkowo zwięzła (161 stron głównego tekstu), co można uznać za jej zaletę. Jednakże, w niektórych przypadkach, korzystne byłoby krótsze ujęcie poruszanych zagadnień ogólnych i wyeliminowanie powtórzeń. Z drugiej strony – recenzentka sugerowałaby uzupełnienie tekstu o formuły czy też algorytmy obliczeń kluczowych parametrów i o kilka dodatkowych rycin (jak zaznaczyła w niektórych miejscach tekstu pracy).

Praca jest poprawna pod względem redakcyjnym i językowym (uchybień są niewielkie, dotyczą głównie interpunkcji). Sposób niektórych powołań na literaturę i źródła, podpisy tabel i rycin wymagają nieznacznych poprawek lub uzupełnień (uwagi dot. sugerowanych korekt podano na końcu niniejszej recenzji i bezpośrednio w tekście rozprawy).

Podane uwagi nie umniejszają wartości rozprawy.

4. Wniosek końcowy

Według mojej oceny recenzowana rozprawa doktorska Pani mgr Marty Wiśniewskiej pt. „Znaczenie warunków geologicznych dla możliwości poboru energii niskiej entalpii przez pionowe gruntowe wymienniki ciepła (na obszarze Łodzi)” spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy.

Wnioskuje zatem o dopuszczenie Pani mgr Marty Wiśniewskiej do dalszych etapów przewodu doktorskiego i publicznej obrony.

Beata Kępińska

Uwagi dot. strony redakcyjnej i technicznej Rozprawy doktorskiej

o Cytowanie literatury, źródeł danych i informacji:

- w niektórych przypadkach korekty wymaga sposób cytowania opracowań zbiorowych i pod redakcją, a także uwzględnienie w Spisie literatury wszystkich autorów cytowanych 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).

o Interpunkcja i stylistyka:

- używanie przecinków – w tym względzie tekst wymaga korekt (co zaznaczono w tekście),
- literówki (przestawienia, braki pojedynczych liter),
- kilka sugerowanych zmian co do używanego słownictwa zaznaczono w tekście Rozprawy.

o Ryciny i tabele:

- szczegóły w podpisach niektórych rycin i tabel powinny odpowiadać wyrazom i sformułowaniom w tekście głównym, gdzie są powołania na nie (jak zaznaczono w konkretnych przypadkach),
- objaśnienia do niektórych rycin wymagają drobnych uzupełnień (o podziałkę, podanie lokalizacji przekrojów, itp.).

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

RVL.