

Dr inż. Aneta Sapińska-Śliwa

Akademia Górniczo – Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu

Katedra Wiertnictwa i Geoinżynierii

**Wniosek o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego  
w dziedzinie nauk technicznych**

## **AUTOREFERAT**

Kraków 2019

## **Spis treści**

I. Informacje o wykształceniu .....	3
II. Informacje o zatrudnieniu .....	4
III. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 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 ze zm.).....	4
III.1. Opisanie celu naukowego i osiągniętych wyników oraz ich wykorzystanie.....	7
III.2. Opis osiągnięcia naukowego .....	10
IV. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych .....	27

## I. Informacje o wykształceniu

### Aneta Sapińska-Śliwa

- 1) Data i miejsce urodzenia: 30 lipca 1973 r., Łódź
- 2) 1992–1998 – dzienne studia inżynierskie i magisterskie, Politechnika Łódzka, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska. Kierunek: Inżynieria środowiska. Uzyskany tytuł: mgr inż. Studia wyższe ukończone z wynikiem celującym, tytuł pracy magisterskiej: *Wstępna koncesja zagospodarowania wody geotermalnej dla zakładu ogrodniczego Tomaszewski w Skierniewicach*
- 3) 1996 – ukończony międzynarodowy kurs *The Baltic Sea Environment*
- 4) 1997 – III miejsce podczas VII Seminarium Studenckiego „Problemy ochrony środowiska”
- 5) 2001–2002 – studia podyplomowe, École Nationale Supérieure des Techniques Industrielles et des Mines d’Alès, France; (Centre International de Spécialisation en Management de l’Environnement, Législation et Déchets (CISMELED) Międzynarodowe Centrum Zarządzania Środowiskiem, Prawa Unii Europejskiej i Gospodarki Odpadami), Zarządzanie środowiskiem, ustawodawstwo UE i odpady, ukończone z wynikiem bardzo dobrym
- 6) 2005–2009 – studia doktoranckie, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu
- 7) 2007 – Geoproduction Consultants Instrumentation Process, Paris, France, staż przemysłowy
- 8) 2007 – BRGM Orléans, France, staż naukowy
- 9) 2007 – Fiberglass Tubes & Services GmbH, Nienhagen, Niemcy, staż przemysłowy
- 10) listopad 2009 – Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH w Krakowie, dr nauk technicznych w dyscyplinie: górnictwo i geologia inżynierska. Tytuł rozprawy doktorskiej: *Warunki technologiczno-ekonomiczne zagospodarowania wody termalnej Uniejowie*
- 11) 2010 – ukończenie kursu pn. „Być przedsiębiorcą. Własna firma spin off, spin out” (nr WND-POKL.08.02.01-12-006/09), realizowany przez Combidata Poland Sp z o.o. w ramach Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki, Priorytet VIII Regionalne kadry gospodarki, Działanie 8.2 Transfer wiedzy, Poddziałanie 8.2.1 Wsparcie dla współpracy sfery nauki i przedsiębiorstw
- 12) 2011 – ukończone warsztaty projektanta Ruvolum firmy Geobruugg AG
- 13) 2011 – ukończenie Studium Doskonalenia Dydaktycznego dla Pracowników i Doktorantów AGH

## II. Informacje o zatrudnieniu

- 1) 1996–1998 – Politechnika Łódzka, Ośrodek Zapobiegania Zanieczyszczeniu Środowiska „SOZO” przy Politechnice Łódzkiej, staż asystencki, umowa o dzieło
- 2) 1999–2004 – Wojewódzki Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej w Łodzi; stanowisko: inspektor, koordynator projektu - udostępnienie złoża i budowa sieci ciepłowniczej na bazie wód geotermalnych w Uniejowie
- 3) 2005–2009 – Stowarzyszenie Gmin Polska Sieć „Energie Cités” w Krakowie, stanowisko: kierownik projektów
- 4) 2009–2010 – AGH w Krakowie, Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, Katedra Wiertnictwa i Geoinżynierii, stanowisko: asystent
- 5) 2010–obecnie – AGH w Krakowie, Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, Katedra Wiertnictwa i Geoinżynierii, stanowisko: adiunkt
- 6) 2011 – wykład ekspercki dotyczący źródeł geotermalnych i udział w debacie podczas Forum Funduszy Europejskich w Łodzi, umowa z Zarządem Województwa Łódzkiego

## III. Wskazanie osiągnięcia<sup>1</sup> wynikającego z art. 16 ust. 2 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 ze zm.)

Tytuł osiągnięcia naukowego:

**„Poprawa efektywności pozyskania ciepła z górotworu z wykorzystaniem otworów wiertniczych”**

Cykl publikacji powiązanych tematycznie stanowiących osiągnięcie naukowe:

[PW-1] **Sapińska-Śliwa A.**, 2019, *Efektywność pozyskania ciepła z górotworu w aspekcie sposobu udostępnienia otworami wiertniczymi*, Wydawnictwo AGH, ISBN 978-83-66016-94-1.

Monografia, punktacja MNiSW (2018), 25.000 (80.000 – 2019), udział habilitantki – 100%

[PW-2] **Sapińska-Śliwa A.**, Rosen M.A., Gonet A., Kowalczyk J., Śliwa T., 2019, *A new method based on thermal response tests for determining effective thermal conductivity and borehole resistivity for borehole heat exchangers*, Energies; 2019, vol. 12, iss. 6, s. 1–22.

Artykuł w czasopiśmie, punktacja (lista A czasopism MNiSW, 2017): 25.000, IF=2.676 (2017), IF<sub>5</sub> = 3.045 (2017), udział habilitantki – 65%

---

<sup>1</sup> W przypadku, gdy osiągnięciem tym jest praca/prace wspólne, należy przedstawić oświadczenia wszystkich jej współautorów, określające indywidualny wkład każdego z nich w jej powstanie.

[PW-3] Śliwa T., Kruszewski M., Zare A., Assadi M., **Sapińska-Śliwa A.**, 2018, *Potential application of vacuum insulated tubing for deep borehole heat exchangers*, Geothermics; ISSN 0375-505, vol. 75, s. 58–67, Bibliogr. s. 66–67.

Artykuł w czasopiśmie, punktacja (lista A czasopism MNiSW, 2017): 35.000, IF=2.693 (2017), IF<sub>5</sub>=2.942 (2017), udział habilitantki – 55%

[PW-4] Śliwa T., Stryczek S., Wysogład T., Skakuj A., Wiśniowski R., **Sapińska-Śliwa A.**, Bieda A., Kowalski T., 2017, *Wpływ grafitu i diatomitu na parametry wytrzymałościowe stwardniałych zaczynów cementowych (ang. Impact of graphite and diatomite on the strength parameters of hardened cement slurries)*, Przemysł Chemiczny, ISSN 0033-2496, t. 96, nr 5, s. 960–963, Bibliogr. s. 963.

Artykuł w czasopiśmie; punktacja (lista A czasopism MNiSW, 2017): 15.000, IF=0.399 (2017), IF<sub>5</sub>=0.345 (2017), udział habilitantki – 50%

[PW-5] **Sapińska-Śliwa A.**, Śliwa T., Wiśniowski R., 2017, *Grafit i diatomit jako dodatki do zaczynów uszczelniających otwory w geotermii (ang. Graphite and diatomite as additives for grouts for boreholes in geothermics)*, Przemysł Chemiczny, ISSN 0033-2496, t. 96, nr 8, s. 1723–1725, Bibliogr. s. 172.

Artykuł w czasopiśmie; punktacja (lista A czasopism MNiSW, 2017): 15.000, IF=0.399 (2017), IF<sub>5</sub>=0.345 (2017) udział habilitantki – 80%

[PW-6] Jaszczur M., Polepszy I, **Sapińska-Śliwa A.**, Gonet A., 2017, *An analysis of the numerical model influence on the ground temperature profile determination*, Journal of Thermal Science; ISSN 1003-2169, vol. 26, no. 1, s. 82–88, Bibliogr. s. 88.

Artykuł w czasopiśmie; punktacja (lista A czasopism MNiSW, 2017): 15.000, IF=0.678 (2017), IF<sub>5</sub>=0.709 (2017) %, udział habilitantki – 50%

[PW-7] **Sapińska-Śliwa A. (red.)**; aut.: **Sapińska-Śliwa A.**, Wiglusz T., Kruszewski M., Śliwa T., Kowalski T., 2017, *Wiercenia geotermalne: techniki oraz zagadnienia poboczne (ang. Geothermal drilling: techniques and side aspects)*, Monografia – praca zbiorowa, Kraków, Fundacja Wiertnictwo-Nafta-Gaz, Nauka i Tradycje; Laboratorium Geoenergetyki, ISBN: 978-83-65196-75-0, s. 174, (Laboratory of Geoenergetics Book Series; vol. 3, Bibliogr. s. 167–174.

Redaktor i współautor monografii; punktacja MNiSW (2017): 10.000, udział habilitantki – 70%

[PW-8] **Sapińska-Śliwa A.**, Rosen M.A., Gonet A., Śliwa T., 2016, *Deep borehole heat exchangers – a conceptual and comparative review*, International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration; ISSN 2010-1325, vol. 24, iss. 1, art. no. 1630001, s. 1–15.

Artykuł umieszczony w bazie Web of Science (WoS), udział habilitanta – 70%

[PW-9] Śliwa T., **Sapińska-Śliwa A.**, Wiśniowski R., Piechówka Z., Krzemień M., Pycha D., Jaszczur M., 2016, *Influence of flow rate and heating power in effective thermal conductivity applied in borehole heat exchangers*, Journal of Physics. Conference Series; ISSN 1742-6588, vol. 745, art. no. 032086, s. 1–8, Bibliogr. s. 8.

Artykuł w czasopiśmie, punktacja (lista czasopism MNiSW, 2016): 15.000, udział habilitantki – 55%

[PW-10] Jaszczur M., Polepszyc I., Biernacka B., **Sapińska-Śliwa A.**, 2016: *A numerical model for ground temperature determination*, Journal of Physics. Conference Series; ISSN 1742-6588, vol. 745, art. no. 032007, s. 1–8, Bibliogr. s. 8.

Artykuł w czasopiśmie, punktacja (lista czasopism MNiSW, 2016): 15.000, udział habilitantki – 50%

[PW-11] Śliwa T., Nowosiad T., Vytyaz O., **Sapińska-Śliwa A.**, 2016: *Study on the efficiency of deep borehole heat exchangers*, SOCAR Proceedings; ISSN 2218-6867, no. 2, s. 29–42, Bibliogr. s. 40–41.

Artykuł umieszczony w bazie Web of Science (WoS), udział habilitanta=60%

[PW-12] **Sapińska-Śliwa A.**, Dudek M., Wiśniowski R., Jaszczur M., Śliwa T., 2016, *Pozyskiwanie surowców mineralnych z wód termalnych w Polsce (ang. Applicability of geothermal waters in Poland to recovering the raw materials)*, Przemysł Chemiczny, ISSN 0033-2496, t. 95 nr 8, s. 1524–1528, Bibliogr. s. 1528.

Artykuł w czasopiśmie; punktacja (lista A czasopism MNiSW, 2016): 15.000, IF=0.385, IF<sub>5</sub>=0.329 (2016), udział habilitantki – 70%

[PW-13] Jaszczur M., Polepszyc I., **Sapińska-Śliwa A.**, 2015, *Numerical analysis of the boundary conditions model impact on the estimation of heat resources in the ground*, Polish Journal of Environmental Studies; ISSN 1230-1485, vol. 24 no. 5A, s. 60–66, Bibliogr. s. 66.

Artykuł w czasopiśmie; punktacja (lista A czasopism MNiSW, 2015): 15.000., IF=0.790 (2015), udział habilitantki – 50%

[PW-14] **Sapińska-Śliwa A. (red.)**; aut.: **Sapińska-Śliwa A.**, Śliwa T., Knez D., Gonet A., Wiśniowski R., 2015, *Selected aspects of drilling production and use of geothermal energy and waters*, Monografia – praca zbiorowa, Kraków, Fundacja Wiertnictwo-Nafta-Gaz, Nauka i Tradycje, ISBN: 978-83-64479-02-12015, s. 121, Bibliogr. s. 111–121.

Redaktor i współautor monografii; punktacja MNiSW (2015): 30.000, udział habilitantki – 60%

Łączny IF dla cyklu publikacji:	<b>8,020</b>
Łączna liczba punktów MNiSW dla cyklu publikacji:	<b>230 (285<sup>2</sup>)</b>
Łączny IF dla publikacji wydanych po doktoracie:	<b>8,419</b>
Łączna liczba punktów MNiSW dla publikacji wydanych po doktoracie:	<b>556 (611<sup>3</sup>)</b>

<sup>2</sup> Łączna liczba punktów MNiSW dla cyklu publikacji przy punktacji [PW-1] za 80.000.

<sup>3</sup> Łączna liczba punktów MNiSW dla publikacji wydanych po doktoracie przy punktacji [PW-1] za 80.000.

### III.1. Opisanie celu naukowego i osiągniętych wyników oraz ich wykorzystanie

Zagadnienia naukowe dotyczące geotermii stają się coraz bardziej istotne w Polsce i na świecie. Różnorodność warunków geologicznych jest jednym z podstawowych czynników zmienności i konieczności ciągłego rozwoju tej tematyki.

W pojęciu „geotermia” zawarte są zagadnienia związane z *poszukiwaniem, udostępnianiem, wydobywaniem, transportem i wykorzystaniem energii geotermalnej*<sup>4</sup>. Ciepło zgromadzone w skorupie Ziemi jest pochodzenia ziemskiego, słonecznego i innego (antropogenicznego). Energia geotermalna to ciepło, którego genezą jest planeta Ziemia. Powstało w czasie tworzenia się planety (około 20%) oraz z rozpadu pierwiastków promieniotwórczych, głównie w płaszczu ziemskim (80%). Zużywane jest na transformacje planety (konwekcja w płaszczu i ruch kontynentów, przyspieszony ruch jądra wewnętrznego<sup>5</sup>) oraz na promieniowanie do przestrzeni kosmicznej (średnio  $87 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ , sumarycznie  $44\,200 \text{ GW}$ <sup>6</sup>). Temperatura Ziemi nierównomiernie przyrasta z głębokością. Największy przyrost temperatury (gradient geotermiczny) występuje w skorupie ziemskiej. Maksymalna temperatura występuje w jądrze Ziemi i wynosi  $6230 \pm 500 \text{ K}$ <sup>7</sup>.

Ilość ciepła innego pochodzenia niż ciepło geotermalne w skorupie ziemskiej jest marginalna. Staje się ono jednak interesujące z punktu widzenia wykorzystania gospodarczego. Dotyczy to zwłaszcza ciepła wprowadzanego do skorupy ziemskiej w procesie tzw. podziemnego magazynowania ciepła<sup>8</sup>. Zakładając, iż nie jest to ciepło geotermalne nie podlega pod definicję geotermii. Stąd wprowadzenie pojęcia „geoenergetyki”, która w skrócie obejmuje geotermię i magazynowanie ciepła dowolnego pochodzenia w skałach górotworu. Analogicznie więc do powyższej definicji „geotermii” należy podać definicję „geoenergetyki”, która obejmuje zagadnienia związane z *poszukiwaniem, udostępnianiem, wydobywaniem, transportem i wykorzystaniem energii geotermalnej oraz magazynowaniem ciepła dowolnego pochodzenia w górotworze wraz z jego udostępnianiem, wydobywaniem, transportem i wykorzystaniem*.

Ponieważ możliwe jest magazynowanie w górotworze także ciepła geotermalnego (np. regeneracja zasobów ciepła w podziemnych magazynach ciepła z geotermalnej sieci ciepłowniczej lub geotermalne podgrzewanie murawy boiska), można zmodyfikować definicję „geoenergetyki” do formy: *poszukiwanie, udostępnianie, wydobywanie, transport, wykorzystanie i magazynowanie energii geotermalnej oraz magazynowanie ciepła innego pochodzenia w górotworze wraz z jego udostępnianiem, wydobywaniem, transportem i wykorzystaniem*. Taka definicja wydaje się w pełni oddawać sens i zakres moich badań.

Energia geotermalna, która emitowana jest do przestrzeni kosmicznej, może być częściowo zagospodarowana przez cywilizację ludzką jako ciepło użytkowe lub energia elektryczna. Ciepło magazynowane w górotworze (np. ciepło słoneczne z procesu klimatyzacji wewnątrz w systemach z pompami ciepła lub gorąca woda z elektrociepłowni wprowadzana latem do warstw wodonośnych) jest obecnie wykorzystywane jedynie do celów ciepłowniczych.

<sup>4</sup> Hachnlein S., Bayer P., Blum P., International legal status of the use of shallow geothermal energy, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2010, vol. 14, iss. 9, s. 2611-2625.

<sup>5</sup> Kerr R.A., Earth's inner core is running a tad faster than the rest of the Planet, *Science* 2005, 5739 (309), s. 1313.

<sup>6</sup> Pollack H.N., Hurter S.J., Johnson J.R., Heat flow from the Earth's interior: Analysis of the global data set, *Reviews of Geophysics* 1993, 31/3, s. 267-280.

<sup>7</sup> Anzellini S., Dewaele A., Mezouar M., Loubeyre P., Morard G., Melting of iron at Earth's inner core boundary based on fast X-ray diffraction, *Science* 2013, 340 (6131), s. 464-466.

<sup>8</sup> Sapińska-Słiwa A., Efektywność pozyskiwania ciepła z górotworu w aspekcie sposobu udostępniania otworami wiertniczymi (Effectiveness of heat recovery from rock mass in the context of the production method by means of boreholes), Wydawnictwa AGH, Kraków 2019 [PW-1].

Kluczowym zagadnieniem geoenergetyki, bez którego nie istnieją przemysłowe jej zastosowania (poza nielicznymi lokalizacjami na obszarach aktywności tektonicznej i w mniejszej skali, np. na Islandii<sup>9</sup>) są otwory wiertnicze. Moje prace naukowe skupiały się na działaniach zmierzających do poprawy efektywności, głównie energetycznej, w geoenergetyce.

W niniejszym autoreferacie oraz w ostatnich moich publikacjach stosuję pojęcie wody „geotermalne” zamiast „termalne”. Takie pojęcie stosowane jest w literaturze międzynarodowej i bardziej trafnie oddaje genezę ciepła zawartego w wodzie. Obecnie w ustawie *Prawo geologiczne i górnicze* (Dz.U. 2011, nr 163, poz. 981), która definiuje pojęcie wody „termalne”, procedowana jest zmiana tego zapisu.

## Cel prac naukowo-badawczych

Głównym celem prowadzonych przeze mnie badań naukowych jest zwiększenie efektywności energetycznej w geoenergetyce poprzez zastosowanie modyfikowanych zaczynów uszczelniających/wypełniających w otworach wiertniczych. Różnica pomiędzy zaczynem uszczelniającym i wypełniającym wynika z ich funkcji. Zaczyny uszczelniające stosowane są do uszczelniania kolumn rur okładzinowych lub rur wymienników ciepła. Ma to znaczenie w przypadku występowania w profilu geologicznym wód podziemnych, które w niekontrolowany sposób mogłyby przepływać pomiędzy warstwami lub wydobywać się na powierzchnię. Zaczyny wypełniające są stosowane, jeżeli ich jedynym zadaniem jest stabilne wypełnienie materiałem stałym zbędnych przestrzeni występujących w otworach. Mogą tym samym poprawić lub zredukować przepływ ciepła pomiędzy nośnikiem a górotworem<sup>10</sup>.

Zaczyny uszczelniające kolumny rur okładzinowych stosuje się w otworach poszukiwawczych, rozpoznawczych, ropnych i gazowych oraz w otworach geotermalnych, tam gdzie występuje konieczność uszczelnienia interwałów przepuszczalnych. Ponadto w otworowych wymiennikach ciepła, gdzie występują dwie lub więcej warstwy wodonośne. Wody z tych poziomów mogłyby się mieszać za pośrednictwem nieszczelnego otworu. W przypadku jednej warstwy wodonośnej z ciśnieniem artezyjskim bez uszczelnienia w otworze następowałby samowypływ wody.

Wypełnienie w geoenergetyce jest stosowane wtedy, gdy nie ma konieczności uszczelnienia otworu, a jedynie modyfikacja kontaktu pomiędzy górotworem a nośnikiem ciepła. Modyfikacja taka może poprawić lub zmniejszyć wymianę ciepła, w zależności od potrzeb.

W odniesieniu do wód geotermalnych, celem badań naukowych jest ocena efektywności pozyskiwania ciepła z górotworu otworami wiertniczymi. Przyczyną strat energii geotermalnej do górotworu jest radialny gradient temperatury. Zadaniem badawczym jest więc opracowanie możliwości poprawy tej sytuacji przez odpowiednią zmianę konstrukcji projektowanych otworów geotermalnych, a także nowych otworów naftowych ze względu na możliwość ich wykorzystania w przyszłości do eksploatacji wód geotermalnych. Zmiana ta polega na zmniejszeniu przewodnictwa cieplnego w kierunku radialnym w stosunku do osi otworu zgodnie z prawem Fouriera. W praktyce sprowadza się to do zastosowania rur okładzinowych oraz ich uszczelnienia z materiałów o jak najmniejszym przewodnictwie cieplnym.

<sup>9</sup> Ragnarsson Á., Geothermal energy use, country update for Iceland, *Proceedings of European Geothermal Congress 2013* Pisa, Italy, 3-7 June 2013.

<sup>10</sup> Sapińska-Śliwa A., Efektywność pozyskiwania..., op. cit., s.7.



W odniesieniu zaś do otworowych wymienników ciepła, celem moich badań naukowych jest ocena efektywności pozyskiwania ciepła z górotworu przez określenie podstawowych parametrów grzewczych tych wymienników, na podstawie interpretacji wyników testów reakcji termicznej (TRT) różnymi metodami.

Inne zagadnienia związane z efektywnością w geoenergetyce w moich pracach badawczych dotyczą kolumny rur centrycznych w głębokich otworowych wymiennikach ciepła. Celem moich prac naukowo-badawczych jest opracowanie technicznych możliwości rekonstrukcji wyeksploatowanych otworów naftowych dla geoenergetyki. Przyjmując takie założenie należy już na etapie projektowania konstrukcji otworów wiertniczych przewidzieć nowe niezbędne modyfikacje.

## Wyniki prac naukowo-badawczych

Wynikiem prowadzonych prac jest opracowanie sposobów zastosowania modyfikowanych receptur zaczynów uszczelniających. Wyniki obejmują szereg prac laboratoryjnych nad poszukiwaniem dodatków do zaczynów uszczelniających/wypełniających, których zastosowanie spełni następujące zadania: dla jednych rozwiązań poprawiają wymianę ciepła pomiędzy nośnikiem a górotworem, a dla innych zredukują straty ciepła pomiędzy nośnikiem a górotworem. Jednocześnie nie wpłynie to znacząco na koszty sporządzania zaczynów wg takich receptur.

Wynikiem badań jest także opracowanie konstrukcji wewnętrznej kolumny izolującej głębokich otworowych wymienników ciepła. Dodatkowo także opracowanie rozmieszczenia modyfikowanych zaczynów uszczelniających w aspekcie parametrów eksploatacyjnych<sup>11</sup> (szczególnie temperatury wprowadzanego do wymiennika nośnika ciepła).

Ponadto jako wynik moich prac należy przyjąć weryfikację metod oceny efektywności energetycznej głównie za pośrednictwem przeprowadzenia badań terenowych *in-situ* otworowych wymienników ciepła<sup>12</sup>. Istniejące metody interpretacji wyników testów reakcji termicznej nie były dotychczas oceniane pod kątem ich skuteczności przy pomocy analizy statystycznej<sup>13</sup>.

## Wykorzystanie wyników prac naukowo-badawczych

Wykorzystanie wyników moich badań w praktyce ma charakter przyszłościowy. Dotychczas zastosowano je w otworach wiertniczych wykonanych dla potrzeb Laboratorium Geoenergetyki na terenie Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie. Zastosowany tam zaczyn cementowy z dodatkiem grafitu służyć ma zwiększeniu efektywności wymiany ciepła pomiędzy nośnikiem a górotworem<sup>14</sup>. Zastosowanie takich zaczynów umożliwi wykonywanie mniejszej liczby otworów wiertniczych dla uzyskania wymaganej mocy grzewczej. Dodatek grafitu powoduje zwiększenie przewodnictwa cieplnego zaczynów uszczelniających i/lub wypełniających po stwardnieniu<sup>15</sup>.

<sup>11</sup> Śliwa T., Nowosiad T., Vytiaz O., Sapińska-Śliwa A., Study on the efficiency of deep borehole heat exchangers, *SOCAR Proceedings* 2016, no. 2, s. 29–42 [PW-11].

<sup>12</sup> Sapińska-Śliwa A., Rosen M.A., Gonet A., Kowalczyk J., Śliwa T., A new method based on thermal response tests for determining effective thermal conductivity and borehole resistivity for borehole heat exchangers, *Energies* 2019, 12/1072, s. 1-22 [PW-2]

<sup>13</sup> Sapińska-Śliwa A., Efektywność pozyskiwania ..., op. cit., s.7.

<sup>14</sup> Śliwa T., Gonet A., Złotkowski A., Sapińska-Śliwa A., Bieda A., Kowalski T., Laboratorium Geoenergetyki: 10 lat działalności: geotermia na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, (Laboratory of Geoenergetics: 10 years of activity: geothermal energy at the Drilling, Oil and Gas Faculty AGH University of Science and Technology in Krakow), Laboratory of Geoenergetics Book Series; vol. 4, ed. Tomasz Śliwa, Drilling, Oil and Gas Foundation and Geoenergetics Laboratory, Kraków 2017, s. 198.

<sup>15</sup> Sapińska-Śliwa A., Śliwa T., Wiśniowski R., Grafit i diatomit jako dodatki do zaczynów uszczelniających otwory w geotermii (Graphite and diatomite as additives for grouts for boreholes in geothermics), *Przemysł Chemiczny* 2017, vol. 96, iss. 8, s. 1723–1725 [PW-5].

Wyniki badań przewodnictwa cieplnego stwardniałych zaczynów uszczelniających i/lub wypełniających będą wykorzystywane już w niedalekiej przyszłości przy wykonywaniu otworów geotermalnych. Zastosowanie zaczynu o obniżonym przewodnictwie cieplnym w otworach produkcyjnych umożliwi zredukowanie strat ciepła, które istnieją przy przepływie wód geotermalnych z warstw złożowych ku powierzchni terenu<sup>16</sup>.

Przewiduję wykorzystanie rezultatów moich prac naukowych również w przemyśle naftowym. Bazuje ono na hipotezie, zakładającej możliwość wykorzystania otworów ropnych i gazowych, a także poszukiwawczych w geoenergetyce. Zastosowanie receptur zaczynów o modyfikowanym przewodnictwie cieplnym umożliwi efektywniejszą pracę wykorzystanych otworów naftowych w geotermii. Dotyczy to zarówno otworów geotermalnych jak też głębokich i płytkich otworowych wymienników ciepła<sup>17</sup>.

### III.2. Opis osiągnięcia naukowego

Za moje pierwsze osiągnięcie naukowe uznałabym zdefiniowanie i aplikację pojęcia efektywności procesowej w szeroko rozumianej geoenergetyce.

Efektywność jest pojęciem złożonym i posiadającym wiele synonimów, zarówno w literaturze polskiej<sup>18,19,20</sup>, jak i zagranicznej<sup>21,22,23</sup>. W moich badaniach przyjąłabym pojęcie efektywności odnoszące się do procesu. Na podstawie analizy literatury<sup>24</sup> pozyskiwanie energii geotermalnej jest procesem, który może opisać efektywność, definiowaną na wiele sposobów.

Teoria efektywności jest bardzo rozbudowana w ekonomii. Posiada również wiele opisów odnoszących się do organizacji w przemyśle i gospodarce. Z pozyskiwaniem ciepła można wiązać pojęcia sprawności i efektywności w termodynamice. Nie były one przedmiotem moich prac poza zagadnieniem efektywności geotermalnych pomp ciepła określanej ang. skrótem COP (*Coefficient of Performance*).

Moje badania naukowe zawierają się w dyscyplinie górnictwo i geologia inżynierska dlatego przyjąłabym że pojęcie efektywności związane jest z procesem, w którym może ono przyjmować wartości czysto techniczne (np. moc grzewcza, wydajność, temperatura, ciśnienie itd). W przypadku otworów geotermalnych efektywność można łatwo określić definiując ją w różny sposób. Przyjęto zatem definicję efektywności w postaci mocy grzewczej możliwej do uzyskania, przy eksploatacji wody z zatwierdzoną wydajnością.

Analiza efektywności otworowych wymienników ciepła jest złożonym zadaniem (problemem). Najistotniejszymi parametrami dla efektywności otworowych wymienników ciepła

<sup>16</sup> Ibidem, s. 9.

<sup>17</sup> Sapińska-Słiwa A., Efektywność pozyskiwania..., op. cit., s. 7.

<sup>18</sup> Skrzypek E., Jakość i efektywność, Wydawnictwo UMCS, Lublin 2000.

<sup>19</sup> Kowal W., Skuteczność i efektywność – różnicowanie i aspekty interpretacji, *Organizacja i Kierowanie* 2013, nr 4 (157), s. 11-23.

<sup>20</sup> Pyszka A., Istota efektywności, Definicje i wymiary, *Studia Ekonomiczne Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach* 2015, vol. 230, s. 13-25, dostęp 20 września 2018 r. [cejsh.icm.edu.pl/cejsh/element/bwmeta1.element.desklight-177c5f71.../01\\_34.pdf](http://cejsh.icm.edu.pl/cejsh/element/bwmeta1.element.desklight-177c5f71.../01_34.pdf).

<sup>21</sup> Henri J.F., Performance measurement and organizational effectiveness: Bridging the Gap, *Managerial Finance* 2004, vol. 30/6, s. 93-123.

<sup>22</sup> Sundstrom E., Altman I., Physical environments and workgroup effectiveness, *Research in Organizational Behavior* 1989, vol. 11, s. 175-209.

<sup>23</sup> Drucker P.F., Managing for business effectiveness, *Harvard Business Review* 1963, vol. 41, no. 3, s. 53-60.

<sup>24</sup> Kwieciński M., Podejście procesowe w przedsiębiorstwie wydobywczym, *CUPRUM – Czasopismo Naukowo-Techniczne Górnictwa Rud* 2014, nr 1 (70), s. 49-67.

są temperatura zatłaczanego nośnika ciepła i strumień jego objętości<sup>25</sup>. Głębokie otworowe wymienniki ciepła mogą pracować dostarczając ciepło w sposób bezpośredni do odbiorcy. W przypadku typowych, wymienników otworowych o głębokości do 200-400 m, ciepło jest odbierane za pośrednictwem pomp ciepła. Dają one możliwość pozyskiwania z górotworu ciepła niskotemperaturowego. Dolna wartość temperatury nie jest sprecyzowana, wpływa jednak na efektywność (COP) pomp ciepła w korelacji z wymaganą temperaturą układu odbiorczego.

Poza tym, dla zwiększenia efektywności (ekonomicznej, energetycznej i ekologicznej) w geoenergetyce istotnych jest wiele innych parametrów, nie tylko związanych z geologią czy górnictwem (wiertnictwem). Obejmują one szereg zagadnień dotyczących ciepłownictwa, rekreacji, balneologii, zagadnienia korozji i wytrącania minerałów wtórnych i wiele innych<sup>26</sup>. Rozwój geoenergetyki, zwłaszcza płytkiej, jest też czynnikiem stymulującym rozwój w technikach i technologiach wiertniczych. Dotyczy to w szczególności metody udarowo-obrotowej<sup>27</sup>.

Metodą okrętną wykonuje się wymienniki spiralne a także wiercenia pod pale nośne, w tym termopale. Otworowe wymienniki ciepła realizuje się z zastosowaniem metody obrotowej i udarowo-obrotowej, natomiast otwory geotermalne metodą obrotową, ale są już przykłady wierceń głębokich otworów geotermalnych z zastosowaniem metody udarowo-obrotowej o głębokości ponad 6 tys. m (Finlandia<sup>28</sup>). Z wykorzystaniem metod niewiertniczych powstają geotermalne kosze, studnie kopane zasilające w wodę parowniki pomp ciepła itp<sup>29</sup>.

## Nowe klasyfikacje w geoenergetyce

Do osiągnięć naukowych zaliczam również usystematyzowanie wybranych zagadnień związanych z geoenergetyką. Dotyczą one metod pozyskiwania ciepła z górotworu, magazynowania ciepła w górotworze oraz genezy ciepła zawartego w skorupie ziemskiej.

### Podział ze względu na sposoby transportu ciepła pomiędzy powierzchnią Ziemi a górotworem

Nowym zaproponowanym przeze mnie podziałem bazującym na pozyskiwaniu ciepła Ziemi oraz magazynowaniu ciepła w górotworze<sup>30</sup> można operować zarówno w wiertnictwie jak i geoenergetyce. Podział opiera się na trzech możliwościach wydobywania i magazynowania ciepła w górotworze, aktualnie oraz w przyszłości. Są to trzy kategorie ujęć ciepła, do których zaliczyłam przede wszystkim otwory wiertnicze:

- a) otwory geotermalne,
- b) otworowe wymienniki ciepła,
- c) otwory poszukiwawcze, ropne, gazowe i inne.

<sup>25</sup> Śliwa T., Sapińska-Śliwa A., Wiśniowski R., Piechówka Z., Krzemień M., Pycha D., Jaszczur M., Influence of flow rate and heating power in effective thermal conductivity applied in borehole heat exchangers, *Journal of Physics. Conference Series* 2016, European Thermal-Sciences Conference (Eurotherm 2016, 19–23 June 2016, Krakow, Poland), vol. 745 no. 032086, s. 1–8, [PW-9].

<sup>26</sup> Sapińska-Śliwa A., Śliwa T., Knez D., Gonet A., Wiśniowski R., Selected aspects of drilling, production and use of geothermal energy and waters, Monografia – praca zbiorowa, red. Sapińska-Śliwa A., Fundacja Wiertnictwo-Nafta-Gaz, Nauka i Tradycje, Kraków 2015, s. 121, [PW-14].

<sup>27</sup> Sapińska-Śliwa A., Wigłusz T., Kruszewski M., Śliwa T., Kowalski T., Wiercenia geotermalne: techniki oraz zagadnienia poboczne (ang. Geothermal drilling: techniques and side aspects), Fundacja Wiertnictwo-Nafta-Gaz, Nauka i Tradycje; Laboratorium Geoenergetyki, Kraków 2017, s. 174, (*Laboratory of Geoenergetics Book Series*, vol. 3) [PW-7].

<sup>28</sup> Kępińska B., Rozwój geotermii oraz aktualne wyzwania techniczne i geologiczne, Seminarium Sekcji Wiertnictwa i Górnictwa Otworowego Komitetu Górnictwa PAN, 25.02.2019, AGH WWNiG, Kraków 2019, prezentacja, s. 49.

<sup>29</sup> Sapińska-Śliwa A., Wigłusz T., Kruszewski M., Śliwa T., Kowalski T., Wiertnictwo geotermalne..., op. cit., s. 11.

<sup>30</sup> Sapińska-Śliwa A., Efektywność pozyskiwania..., op. cit., s. 7.

Do pierwszej kategorii zaliczyłam otwory lub ujęcia naturalne, którymi wydobywane lub zatłaczane są płyny mające za zadanie unoszenie ciepła. Kategoria ta została nazwana „otwory geotermalne”. Obejmuje ujęcia ciepła posiadające hydrauliczny kontakt z górotworem (systemy otwarte). Można w tej grupie przytoczyć przykłady:

- studnie w rejonach wysadów solnych;
- studnie za wodami podziemnymi wiercone i kopane;
- wyrobiska kopalni podziemnych;
- otwory pozyskujące wody odwadniające (np. kopalnie podziemne);
- klasyczne otworowe ujęcia geotermalnej energii cieplnej systemem produkcyjno-zatłaczającym (duplety geotermalne, triplety itd.);
- systemy HDR i/lub EGS z nośnikiem ciepła w postaci wody, dwutlenku węgla i innych;
- otwory produkcyjne z dwu lub trójfazowym przyływem (przy jednej z faz w postaci wody).

Do kategorii drugiej zaliczyłam wyrobiska, które wyposażone w specjalne instalacje rurowe umożliwiają wymianę ciepła z górotworem bez kontaktu hydraulicznego (systemy zamknięte):

- pojedyncza U-rurka (rys. 1f);
- multi U-rurka (rys. 1c);
- mikro U-rurka (rys. 1e) w tzw. systemach z bezpośrednim parowaniem<sup>31</sup>;
- wymiennik współosiowy<sup>32,33</sup> (rys. 1b);
- wymiennik spiralny<sup>34,35</sup> (rys. 1g);
- termopale<sup>36</sup> (rys. 1h);
- radialne zespoły wymienników otworowych<sup>37</sup> (ang. *Geothermal Radial Drilling* – GRD) (rys. 1d);
- geotermalne kosze<sup>38,39</sup> (rys. 1a);
- konstrukcje 3-rurowe i kombinowane<sup>40</sup> (rys. 1i);
- przypowierzchniowe poziome instalacje rur wymienników ciepła w gruncie.

<sup>31</sup> Śliwa T., Gawęł M., Piotrowska N., System otworowych wymienników ciepła z bezpośrednim parowaniem czynnika grzewczego w Pałeczniczy (Borehole heat exchangers system with direct evaporation in Pałecznicza village), *GLOBEnergia* 2014, nr 4, s. 32–33.

<sup>32</sup> Śliwa T., Rosen M.A., Natural and artificial methods for regeneration of heat resources for borehole heat exchangers to enhance the sustainability of underground thermal storages: A review, *Sustainability* 2015, vol. 7, s. 13104–13125.

<sup>33</sup> Beier R.A., Acuña J., Mogensen P., Palm B., Borehole resistance and vertical temperature profiles in coaxial borehole heat exchangers. *Applied Energy* 2013, vol. 102, s. 665–675.

<sup>34</sup> Zarrella A., De Carli M., Heat transfer analysis of short helical borehole heat exchangers, *Applied Energy* 2013, vol. 102, s. 1477–1491.

<sup>35</sup> Zarrella A., Capozza A., De Carli M., Analysis of short helical and double U-tube borehole heat exchangers: A simulation-based comparison, *Applied Energy* 2013, vol. 112, s. 358–370.

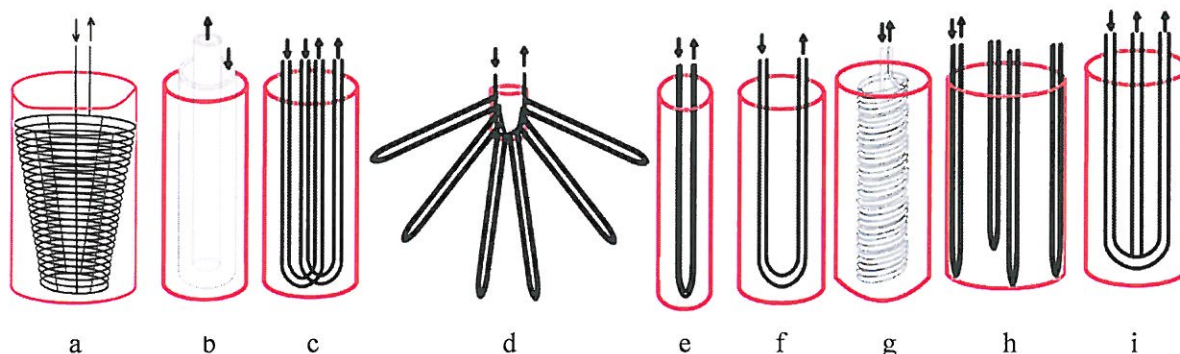
<sup>36</sup> Li M., Lai A.C.K., Heat-source solutions to heat conduction in anisotropic media with application to pile and borehole ground heat exchangers, *Applied Energy* 2012, 96, s. 451–458.

<sup>37</sup> Śliwa T., Kucper M., Accessing Earth's heat using geothermal radial drilling for borehole heat exchangers, *AGH Drilling, Oil, Gas* 2017, vol. 34 no. 2, s. 495–512.

<sup>38</sup> Boughanmi H., Lazaar M., Bouadila S., Farhat A., 2015, Thermal performance of a conic basket heat exchanger coupled to a geothermal heat pump for greenhouse cooling under Tunisian climate, *Energy and Buildings* 2015, vol. 104, s. 87–96.

<sup>39</sup> Ferrari M., Barbaresi A., Tinti F., Brunelli D., Benni S., Torreggiani D., Verdecchia A., Bedeschi E., Bruno R., Tassinari P., Performance evaluation of a homemade cylindrical basket heat exchanger, by a multi-sensors monitoring campaign, *Proceedings European Geothermal Congress*, Strasbourg 2016, 19–23 September 2016, paper T-HP-105.

<sup>40</sup> Śliwa T., Gonet A., Sapińska-Śliwa A., Złotkowski A., Laboratorium Geoenergetyki – 10 lat działalności na Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie (Geoenergetics Laboratory – 10 years of activity at the AGH University of Science and Technology in Krakow), *Technika Poszukiwań Geologicznych Geotermia, Zrównowazony Rozwój* 2018, vol. 57 iss. 1, s. 141–163.



Rys. 1. Wizualizacja konstrukcji otworowych wymienników ciepła, a – kosz geotermalny, b – wymiennik centryczny, c – wymiennik z podwójną U-rurką, d – wymiennik typu GRD, e – wymiennik z mikroU-rurką, f – wymiennik z pojedynczą U-rurką, g – wymiennik spiralny, h – termopal, i – wymiennik potrójny

### Podział wyrobisk służących pozyskiwaniu ciepła z górotworu i wprowadzaniu ciepła celem jego magazynowania

Kolejna klasyfikacja zaproponowana przeze mnie ma za zadanie usystematyzowanie pochodzenia wyrobisk służących do pozyskiwania ciepła oraz jego wprowadzania do górotworu. Zaliczają się do nich:

- specjalnie wiercone otwory;
- wyeksplotowane otwory przeznaczone do likwidacji;
- negatywne otwory poszukiwawcze;
- przywrócone otwory zlikwidowane;
- wyrobiska pochodzenia nie wiertniczego, w tym kopanki (studnie kopane), rowy, wyrobiska wciskane i wbijane (np. energetyczne pale nośne, tzw. termopale<sup>41</sup>).

### Podział ciepła w górotworze ze względu na jego genezę

Klasyfikację odnoszącą się do podziału ciepła znajdującego się w górotworze ze względu na jego genezę proponuję podzielić na:

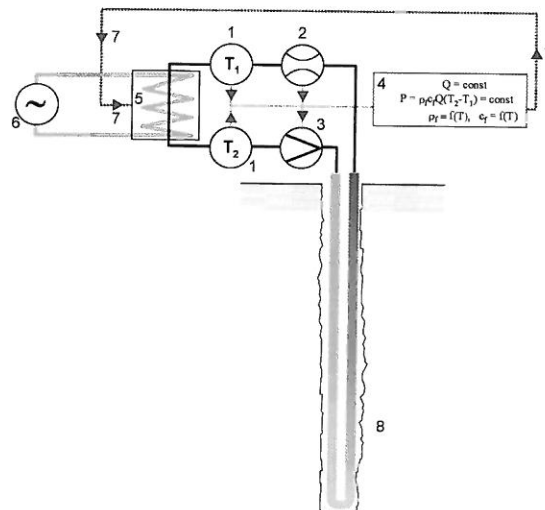
- ciepło geotermalne (w tym 80% z rozpadu pierwiastków promieniotwórczych – powstaje głównie w płaszczu ziemskim; 20% z ciepła rezydualnego stygnącego globu);
- ciepło promieniowania słonecznego (w tym bezpośredniego promieniowania słonecznego na powierzchnię Ziemi oraz powierzchnię wód, pośredniego promieniowania słonecznego na elementy infrastrukturalne, przenikającego bezpośrednio do powierzchni Ziemi lub wód w wyniku konwekcji wiatru, przenikającego pośrednio do powierzchni Ziemi lub wód w wyniku konwekcji wiatru przez elementy infrastrukturalne, unoszone wraz z infiltrującą wodą opadową, ciepło słoneczne wychwytywane dodatkowo w wyniku efektu szklarniowego);
- ciepło antropogeniczne, wprowadzane do górotworu w wyniku działalności ludzi, a pochodzące z różnych źródeł, głównie ze spalania paliw kopalnych, energii słonecznej, elektrycznej i innej. Można w tej grupie wymienić m. in:
  - metody termiczne zwiększania stopnia szczypania złóż ropy naftowej polegające na wygrzewaniu złóż lub wewnątrzpokładowym spalaniu;

<sup>41</sup> Śliwa T., Zapiór P., Sapińska-Śliwa A., Złotkowski A., Thermal response tests of energy pile with different heat carriers, *AGH Drilling, Oil, Gas* 2018, vol. 35, no. 2.

- termiczne metody wewnątrzpokładowego zgazowania węgla;
- metody otworowej eksploatacji siarki;
- różne formy utylizacji odpadów o podwyższonej temperaturze;
- składowiska odpadów podlegających rozkładowi;
- tzw. miejskie wyspy ciepła<sup>42</sup> obejmujące transport, struktury urbanistyczne, technologie przemysłowe oraz metabolizm ludzi (dla przykładu średni roczny strumień ciepła antropogenicznego z obszaru Poznania wyznaczono na poziomie 72 GJ na mieszkańca<sup>43</sup> - z czego część trafia do górotworu, np. z ciepłociągów);
- procesów chłodniczych w tym klimatyzacji wnętrz.

## Ocena efektywności w geoenergetyce

Podstawowym testem dla określania efektywności otworowych wymienników ciepła jest test reakcji termicznej (TRT). Polega on na wymuszeniu cyrkulacji nośnika ciepła (rys. 2) w wymienniku otworowym za pomocą pompy obiegowej (3). Nośnik ciepła jest równocześnie ogrzewany (lub schładzany<sup>44</sup>) urządzeniem grzewczym (5) przy stałym strumieniu ciepła (mocy grzewczej). Podczas długoczasowej cyrkulacji (100 godz.) kontrolowany jest przepływomierzem (2) strumień objętości nośnika ciepła i mierzona jest jego temperatura termometrami (1 i 2) na wpływie i wypływie z wymiennika.



Rys. 2. Schemat realizacji TRT, 1 – termometr (z błędem bezwzględnym  $0,1^{\circ}\text{C}$ ), 2 – przepływomierz, 3 – pompa obiegowa, 4 – komputer sterujący (stabilizacja mocy cieplnej i rejestracja danych), 5 – zestaw nagrzewnic, 6 – źródło energii elektrycznej lub inne źródło ciepła, 7 – sygnał sterujący, 8 – otworowy wymiennik ciepła,  $Q$  – strumień objętości nośnika ciepła,  $P$  – strumień ciepła (moc grzewcza),  $T_1$  – temperatura nośnika ciepła (wypływ z otworu),  $T_2$  – temperatura nośnika ciepła (wpływ do otworu),  $\rho_f = f(T)$  – gęstość nośnika ciepła w funkcji temperatury oraz  $c_f = f(T)$  – ciepło właściwe nośnika w funkcji temperatury<sup>45</sup>

<sup>42</sup> Ichinose T., Shimodozono K., Hanaki K., Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo, *Atmospheric Environment* 1999, vol. 33, s. 3897-3909.

<sup>43</sup> Bagiński, Z., Wyznaczanie emisji ciepła antropogenicznego z aglomeracji miejskiej (Anthropogenic heat release from an urban area), *Inżynieria i Ochrona Środowiska* 2006, vol. 9, iss. 1, s. 61-78.

<sup>44</sup> Gehlin S., Spitler J.D., Thermal response test for BTES applications – State of the Art 2001, Proceedings 9<sup>th</sup> International Conference on Thermal Energy Storage FUTURESTOCK, Warsaw 2003.

<sup>45</sup> Sapińska-Śliwa A., Rosen M.A., Gonet A., Kowalczyk J., Śliwa T., A new method..., op. cit., s. 9.

Test umożliwia wyznaczenie podstawowych parametrów otworowego wymiennika ciepła:

- efektywnej przewodności cieplnej  $\lambda_{ef}$  oraz
- jego oporności termicznej  $R_b$ .

Test opiera się na teorii nieskończonego liniowego źródła ciepła bazującej na równaniu przewodnictwa Furiera:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\rho c_p}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Rozwiązaniem równania w układzie cylindrycznym jest zależność:

$$T(r, t) = T_0 + \frac{q}{k\pi\lambda} \int_{\frac{r^2}{4\alpha t}}^{\infty} \frac{e^{-x}}{x} dx \quad (2)$$

która po rozwiązaniu całki daje wzór:

$$T(r, t) = T_0 + \frac{q}{4\pi\lambda} \left[ \ln\left(\frac{4\alpha t}{r^2}\right) - \gamma \right] \quad (3)$$

Stąd w podstawowej metodzie interpretacji wyników TRT efektywną przewodność cieplną w otworowym wymienniku ciepła  $\lambda_{ef}$  oblicza się ze wzoru:

$$\lambda_{ef} = \frac{P}{4\pi \cdot H \cdot k} = \frac{q}{4\pi \cdot k} \quad (4)$$

w którym  $k$  jest współczynnikiem kierunkowym prostej:

$$T(t) = k \cdot \ln(t) + b = \text{const} \quad (5)$$

Oporność termiczna jest również określana za pomocą rozwiązania wzoru (2) ograniczającą się do przestrzeni wymiennika otworowego reprezentowanego przez  $r=r_o$ . Uzyskuje się wtedy wzór:

$$R_b = \frac{1}{q} [T_{av}(t) - T_0] - \frac{1}{4\pi\lambda} \left[ \ln \frac{4\alpha t}{r_o^2} - \gamma \right] \quad (6)$$

Teoretycznie zależność oporności termicznej  $R_b$  od czasu  $t$  powinna być funkcją stałą:

$$R_b(t) = a \cdot t + c = \text{const} \quad (7)$$

We wzorach zastosowano następujące symbole:  $T$  – temperatura (K),  $T_0$  – średnia początkowa temperatura górotworu (K),  $r$  – odległość radialna od liniowego źródła ciepła (m),  $\rho$  – gęstość ośrodka ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ),  $c_p$  – ciepło właściwe ośrodka ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ),  $\lambda$  – przewodnictwo cieplne ośrodka skalnego ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ),  $T_{av}$  – średnia temperatura nośnika ciepła podczas testu reakcji termicznej (K) zmienna w czasie  $t$  (h)  $\alpha$  – dyfuzyjność termiczna skał ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $r_o$  – promień otworu (m),  $\gamma$  – stała Eulera,  $H$  – głębokość otworu (m),  $P$  – moc grzewcza podczas testu reakcji termicznej (W).

W praktyce jednak wykazuje się ona zmiennością, zarówno wzrostem jak też spadkiem w czasie. Przyczyną tego jest niedoskonałość realizacji TRT. Stąd moje badania naukowe skoncentrowały się na nowej metodzie interpretacji wyników testu<sup>46</sup>.

Proponowane podejście opiera się na równaniu rezystywności cieplnej  $R_b$  (6) w funkcji efektywnej przewodności cieplnej w wymienniku  $\lambda=\lambda_{ef}$ . Nowa metoda opiera się na założeniu odpowiadającemu rzeczywistości, że  $R_b$  nie zależy od czasu trwania TRT. Zgodnie z założeniem modelu, reprezentowanym przez równanie (7), jest ono spełnione wtedy i tylko wtedy gdy  $\alpha=0$ . Wyznaczenie efektywnej przewodności cieplnej  $\lambda_{ef}$  sprowadza się do znalezienia takiej wartości  $\lambda$  we wzorze (6) aby uzyskać  $\alpha=0$  w równaniu funkcji (7). Wtedy otrzymuje się wprost, że  $R_b=c$ <sup>47</sup>.

Obydwie metodyki wyznaczania  $\lambda_{ef}$  i  $R_b$  zostały porównane z wykorzystaniem opracowanej przeze mnie metody statystycznej<sup>48</sup>. W okresie 10 lat wykonanych zostało z moim udziałem wiele testów TRT w różnych rejonach Polski. Na bazie ich wyników wykonałam weryfikację i porównanie opisanych metod interpretacji wyników TRT. Z tej pracy wynika, że bardziej stabilne wartości  $\lambda_{ef}$  i  $R_b$ , określane w różnych przedziałach czasowych trwania TRT, uzyskuje się metodą tradycyjną<sup>49</sup>.

## Modyfikowane receptury zaczynów

Jako kolejne osiągnięcie naukowe uznaję modyfikację receptur zaczynów uszczelniających (i wypełniających) stosowanych w geoenergetyce. Do celów regulacji przewodnictwa cieplnego stwardniałych zaczynów uszczelniających wybrałam grafit oraz diatomit. Wybór taki podyktowany był przede wszystkim dostępnością oraz stosunkowo niskim kosztem. Dodatki do zaczynów uszczelniających zmieniają ich parametry, w tym również te związane z przetłaczalnością. Badania świeżych zaczynów z grafitem opisałam w 2011<sup>50</sup>.

Badaniami objęto cement hutniczy CEM III/32,5R, klasy 32,5 o zwiększonej wytrzymałości początkowej oraz dodatki w postaci grafitu i diatomitu. W celu przygotowania zaczynów cementowych najpierw odmierzono odpowiednie ilości składników, po czym wymieszano je ze sobą za pomocą mieszalnika wysokoobrotowego Heavy Duty Blender. Sporządzone zaczyny umieszczono w odpowiednich formach, a następnie poddano kąpeli wodnej. Badane receptury zaczynów cementowych charakteryzowały się zmienną zawartością dodatków oraz różnymi współczynnikami wodnomieszaninowymi (w/m) oraz wodnocementowymi (w/c).

Stwardniałe zaczyny poddano badaniom wytrzymałościowym po 28-dniowej kąpeli wodnej w temperaturze około 20°C. Były one przechowywane w osobnych wannach w związku z potencjalnymi reakcjami jonowymi poszczególnych próbek. Oznaczenia wytrzymałości na zginanie i ściskanie przeprowadzono za pomocą nowoczesnej prasy hydraulicznej Servo-Plus Evolution E183. Dla każdej z receptur utworzono po 3 próbki i każdą z nich poddawano działaniu prasy hydraulicznej w celu oznaczenia wytrzymałości na zginanie, co prowadziło do złamania próbki i uzyskania w sumie 6 części dla jednej receptury. Dla każdej z tych części przeprowadzono oznaczenie wytrzymałości

<sup>46</sup> Śliwa T., Badania podziemnego magazynowania ciepła za pomocą kolektorów słonecznych i wymienników otworowych (Research on underground thermal energy storage by use solar collectors and borehole heat exchangers), Wydawnictwa AGH, Kraków 2012, s. 272.

<sup>47</sup> Sapińska-Śliwa A., Rosen M.A., Gonet A., Kowalczyk J., Śliwa T., A new method..., op. cit., s.9.

<sup>48</sup> Ibidem.

<sup>49</sup> Sapińska-Śliwa A., Efektywność pozyskiwania..., op. cit., s.7.

<sup>50</sup> Stryczek S., M. Sowa, T. Śliwa, A. Gonet, A. Sapińska-Śliwa A., Badania świeżych zaczynów cementowych z dodatkiem grafitu (Fresh cement slurries research with addition of graphite), *Wiertnictwo, Nafta, Gaz* 2011, vol. 28, iss. 4, s. 749–757.



na ściskanie. Algorytm ten pozwolił uzyskać w sumie 3 wartości wytrzymałości na zginanie oraz 6 wartości wytrzymałości na ściskanie dla jednej receptury, z których wyliczono średnie arytmetyczne.

Stwierdzono brak wyraźnej tendencji spadkowej lub wzrostowej wartości wytrzymałości na ściskanie dla zmiennej zawartości grafitu. Natomiast zaobserwowano wyraźną tendencję wzrostową wartości wytrzymałości na ściskanie wraz ze wzrostem zawartości diatomitu.

Próbki cementu użyte do badania zostały wykonane zgodnie z obowiązującą normą PN-EN ISO 10426-2. Były przechowywane na trzy różne sposoby:

- w temperaturze 25°C (próbki A),
- w wodzie (próbki B),
- w piecu nagrzanym do 80°C (próbki C).

Następnie wykonane zostały krążki o grubości 12 mm i 18 mm, jednak do badań wykorzystane zostały jedynie próbki o grubości 12 mm. Wszystkie próbki wykonano z cementu hutniczego CEM III/B-V 32.5 R, o różnych zawartościach grafitu płytkowego oraz o różnych współczynnikach wodno-cementowych (w/c).

Wzrost przewodnictwa cieplnego jest wyraźnie zauważalny dla próbek o współczynniku wodno-cementowym 1,0. Wyraźniejszy wzrost widoczny jest w przypadku próbek osuszonych w piecu (próbki C) niż dla próbek przechowywanych w temperaturze pokojowej (próbki A). Dla próbek o wartości w/c=0,8 tendencja wzrostowa nie jest jednoznaczna<sup>51</sup>.

Diatomit jest pozostałością po glonach jednokomórkowych zwanych okrzemkami. Materiał ten ma bardzo duże zastosowanie jako sorbent w technologiach ochrony środowiska. W latach osiemdziesiątych XX wieku w Polsce podjęto badania laboratoryjne nad zastosowaniem dodatku diatomitów do zaczynów cementowych, stosowanych do uszczelniania rur okładzinowych w otworach naftowych. Badania nad zastosowaniem diatomitów prowadzą również zagraniczni badacze. Diatomit wysokiej klasy jest częstym składnikiem pucolany. W celu obniżenia przewodności cieplnej zaczynów uszczelniających w badaniach zdecydowałam się na użycie diatomitu w formie granulatu drobnego o uziarnieniu od 0,5 do 3,0 mm<sup>52</sup>.

Zmierzone wartości przewodnictwa zależne od zawartości diatomitu zostały przedstawione na podstawie badań opisanych w literaturze<sup>53</sup>. Generalnie zauważalny jest spadek przewodnictwa cieplnego dla prawie wszystkich próbek.

Zaczyny uszczelniające stosowane w otworach wiertniczych charakteryzować powinny się jak najmniejszą przepuszczalnością. Trwają prace nad określeniem wpływu grafitu i diatomitu na przepuszczalność stwardniałych zaczynów. Zaczyny o podwyższonej przewodności cieplnej z grafitem mogą być stosowane także do wykonywania pali energetycznych (termopali). Powinny charakteryzować się dobrą wytrzymałością mechaniczną<sup>54</sup>.

<sup>51</sup> Sapińska-Śliwa A., Śliwa T., Wiśniowski R., Grafit i diatomit ..., op. cit., s. 9.

<sup>52</sup> Ibidem.

<sup>53</sup> Śliwa T., Kowalski T., Stryczek S., Wiśniowski D., Bieda A., Beszlej J., Naklicki M., Piwowarczyk S., Sapińska-Śliwa A., Badania wpływu grafitu na przewodność cieplną stwardniałych zaczynów uszczelniających, *AGH Drilling Oil Gas* 2017, vol. 34, iss. 3, s.811-820.

<sup>54</sup> Śliwa T., Stryczek S., Wysogład T., Skakuj A., Wiśniowski R., Sapińska-Śliwa A., Bieda A., Kowalski T., Wpływ grafitu i diatomitu na parametry wytrzymałościowe stwardniałych zaczynów cementowych (Impact of graphite and diatomite on the strength parameters of hardened cement slurries), *Przemysł Chemiczny* 2017, vol. 96, iss. 5, s. 960–963 [PW-4].

Aktualnie prowadzone są prace badawcze nad zastosowaniem innych materiałów celem regulacji przewodnictwa cieplnego. Na ukończeniu są pomiary związane z zastosowaniem grafenu (w postaci nanoproszku) oraz tlenku grafenu. Pomiary laboratoryjne są realizowane przez studentów WWNiG AGH w ramach prac naukowych w Studenckim Kole Naukowym Geowiert<sup>55</sup>. Umożliwia to studentom uczestniczenie w interesujących i istotnych pracach naukowych. Obiecujące wyniki przewodnictwa uzyskałam dla tlenku grafenu, jednak jego obecny koszt wyklucza zastosowanie tego materiału w wiertnictwie. Rozpoczęłam badania z innymi materiałami, m. in. z rudami metali i szkłem wodnym.

Ze względu na trudne warunki geotechniczne stosuje się odpowiednie metody geoinżynierskie służące wzmocnieniu ośrodka gruntowego. Pale nośne umożliwiają posadowienie budowli na obszarach o słabych właściwościach wytrzymałościowych podłoża. Dzięki systemowi U-rurek zainstalowanemu w palach można stworzyć stosunkowo tani podziemny magazyn ciepła. W dobie wzrastającej roli energii odnawialnej w bilansie energetycznym Polski należy rozwijać systemy tego typu. W przypadku termopali jednak najważniejszym parametrem pozostaje wytrzymałość mechaniczna, ponieważ podstawową funkcją termopala jest jego nośność<sup>56</sup>.

System wymiany ciepła z górotworem za pośrednictwem pali energetycznych wykonanych zgodnie z opracowaną recepturą umożliwia wzrost efektywności zaspokajania potrzeb grzewczych lub grzewczo-chłodniczych, przy zachowaniu parametrów wytrzymałościowych pali. Najkorzystniejsze (przy uwzględnieniu kryterium wytrzymałościowego i przewodnictwa cieplnego) okazało się zastosowanie zaczynu cementowego z 20-proc. dodatkiem grafitu przy współczynniku wodno-cementowym  $w/c=1$ <sup>57</sup>.

## Głębokie otworowe wymienniki ciepła

Zastosowanie uszczelnienia, które posiadać będzie odpowiednio dobraną przewodność cieplną może zwiększyć efektywność energetyczną otworowej eksploatacji ciepła. Można w tym temacie przedstawić trzy przykłady.

Pierwszym podstawowym przypadkiem jest zastosowanie zaczynów o podwyższonej przewodności cieplnej w typowych otworowych wymiennikach ciepła. U-rurki w otworze uszczelnia się, aby zamknąć poziomy wodonośny i poprawić kontakt termiczny nośnika ciepła z górotworem. Im większa więc przewodność cieplna stwardniałego zaczynu uszczelniającego/wypełniającego tym bardziej efektywny wymiennik otworowy. Określiłam efektywność energetyczną wybranego wymiennika otworowego w zależności od przyjętego wypełnienia otworu – przewodności cieplnej materiału uszczelniającego<sup>58</sup>.

W przykładzie wykorzystano dane podziemnego magazynu ciepła w Myszkowie o głębokości otworów 200 m. Odległości pomiędzy otworami wynoszą 10 m. Analizowany podziemny magazyn składa się ze stu otworów. Ilość materiału uszczelniającego potrzebna dla całego systemu otworów wynosi 271 m<sup>3</sup> (otwory o średnicy 143 mm z pojedynczą U-rurką o średnicy 40 mm). Przykład pokazuje, że ze względu na dużą ilość zaczynu nie może on być drogi. System wymienników umożliwia eksploatację 800 MWh ciepła z górotworu rocznie, bez sztucznej regeneracji zasobów.

<sup>55</sup> Mucha P., Soroka H., Badania zaczynów uszczelniających z dodatkiem produktów grafenowych w geotermii, Konferencja Studenckich Kół Naukowych AGH, Kraków 2018.

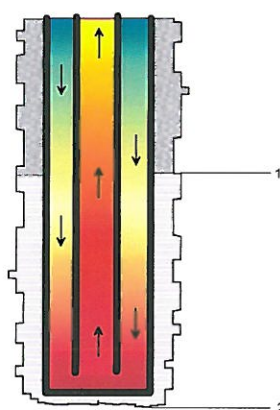
<sup>56</sup> Śliwa T., Stryczek S., Wysogład T., Skakuj A., Wiśniowski R., Sapińska-Śliwa A., Bieda A., Kowalski T., Wpływ grafitu i diatomitu..., op. cit., s.17.

<sup>57</sup> Ibidem.

<sup>58</sup> Sapińska-Śliwa A., Śliwa T., Wiśniowski R., Grafit i diatomit..., op. cit., s. 9.

Temperatura minimalna nośnika zależy przede wszystkim od wartości mocy szczytowej, z jaką pozyskuje się ciepło. Modelowanie matematyczne wykonano w oparciu o program *Earth Energy Designer* (EED3.21). Modelowanie wskazuje, że wpływ przewodnictwa cieplnego na efektywność wymiennika otworowego jest większy przy niższych jego wartościach<sup>59</sup>.

Drugim przypadkiem są głębokie otworowe wymienniki ciepła<sup>60</sup>. Nośnik ciepła może się w nich ogrzać do wyższej temperatury. Zastosowanie U-rurki jest mało efektywne. Stosuje się w takich wymiennikach konstrukcję centryczną. W górnej części otworu straty energii mogą być wynikiem wprowadzania do przestrzeni pierścieniowej nośnika ciepła o temperaturze wyższej niż temperatura otaczających skał. Aby ograniczyć takie straty ciepła należy zastosować w tej części otworu zaczyn uszczelniający o obniżonym przewodnictwie cieplnym. W dolnej części otworu powinien być zastosowany zaczyn o przewodności podwyższonej. Przykładem tak uszczelnionego otworu jest głęboki wymiennik otworowy w Akwizgranie w Niemczech (rys. 3).



Rys. 3. Głęboki otworowy wymiennik ciepła w Akwizgranie, strzałki pokazują kierunek cyrkulacji nośnika ciepła; 1 – 1025 m, głębokość, do której zastosowano zaczyn cementowy o obniżonej przewodności cieplnej, poniżej zaczyn o podwyższonej przewodności; 2 – 2544 m, głębokość otworu<sup>61</sup>

Trzecim przypadkiem są eksploatacyjne otwory geotermalne. Za przykład można podać np. otwór Bańska PGP-1 należący do Przedsiębiorstwa Energetyki Ciepłej "Geotermia Podhalańska" SA. Otwór ten udostępnia wody geotermalne w niecce podhalańskiej, które w warunkach złożowych posiadają temperaturę 90°C<sup>62</sup>. Podczas procesu wydobywania gorącej wody następuje oddawanie ciepła do otaczających skał co skutkuje uzyskaniem na głowicy odwiertu wody o obniżonej temperaturze (na wylocie otworu Bańska PGP-1 temperatura osiąga około 86 °C.) Należy dodać, że temperatura na głowicy rośnie w ciągu czasu eksploatacji w wyniku ogrzewania otaczających skał. Temperatura powyższa na głowicy występuje po ponad 10 latach eksploatacji, więc przy wygrzonym górotworze zmienia się niewiele, zależnie od strumienia objętości eksploatowanej wody. Przy zasobach eksploatacyjnych otworu wynoszących 550 m<sup>3</sup>/h daje to straty ciepła wynoszące ponad 2 MW<sup>63</sup>. Dodatkowo należy zauważyć, że jest to ciepło najbardziej wartościowe, bo posiadające najwyższą temperaturę. Zastosowanie w takim otworze zaczynu uszczelniającego o obniżonej przewodności cieplnej ograniczy straty ciepła do otaczającego górotworu.

<sup>59</sup> Sapińska-Śliwa A., Śliwa T., Wiśniowski R., Grafit i diatomit..., op. cit., s. 9.

<sup>60</sup> Sapińska-Śliwa A., Rosen M.A., Gonet A., Śliwa T., Deep borehole heat exchangers – a conceptual and comparative review, *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration* 2016, vol. 24 iss. 1, art. no. 1630001, s. 1–15 [PW-8].

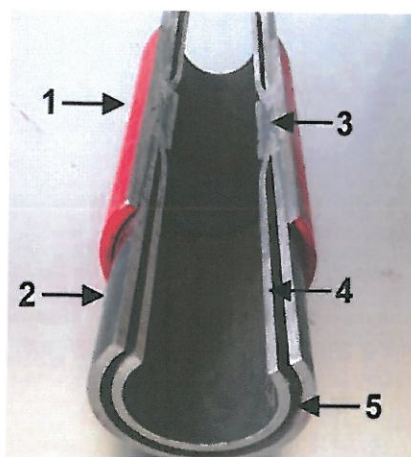
<sup>61</sup> Dijkshoorn L., Speer S., Pechig R., Measurements and design calculations for a deep coaxial borehole heat exchanger in Aachen, Germany, *International Journal of Geophysics* 2013, Article ID 916541, s. 1-14.

<sup>62</sup> Nagy S., Długosz P., Identification of the low-enthalpy Podhale geothermal reservoir based upon long term interference and pulse hydrodynamic testing, *Proceedings of the World Geothermal Congress 2000*, Kyoshu – Tohoku, Japan, May 28-June 10, 2000, s. 2739-2744.

<sup>63</sup> Sapińska-Śliwa A., Efektywność pozyskiwania..., op. cit., s.7.

Innym przykładem jest wykorzystanie zrobów w likwidowanych kopalniach podziemnych. Likwidując wyrobiska zasypuje się je materiałem podsadzkowym, najczęściej piaskiem. W wyrobisku podziemnym można przed wypełnieniem ułożyć rury jako kanały dla przepływu nośnika ciepła. Jeśli materiał podsadzkowy będzie miał podwyższoną przewodność cieplną to efektywność energetyczna takiej instalacji będzie większa<sup>64</sup>.

Efektywność energetyczna głębokich otworowych wymienników ciepła zależy od wielu parametrów. Szczególnie dotyczy to ich konstrukcji<sup>65</sup>. Dotychczas na świecie wykonano niewiele instalacji geotermalnych zwanych głębokimi otworowymi wymiennikami ciepła. Dodatkowo część z nich miała jedynie cel badawczy i została zlikwidowana<sup>66</sup>. Tzw. płytka geotermia (do głębokości 400 m<sup>67</sup>) obejmuje wymienniki otworowe o konstrukcjach przedstawionych na rys. 1c, d, f, i. Pozostałe schematy, poza tym z rys. 1b, dotyczą znacznie płytszych instalacji. W przypadku głębokich otworowych wymienników ciepła najistotniejszym elementem konstrukcyjnym jest wewnętrzna kolumna rur<sup>68</sup> (rys. 1b). Efektywność energetyczna takich wymienników zależy głównie od jej izolacyjności termicznej. Jak dotychczas, ze względów wytrzymałościowych (głębokości do kilku tysięcy metrów), rolę tę mogą pełnić wyłącznie rury stalowe. Wśród nich najkorzystniejszym rozwiązaniem jest zastosowanie rur próżniowych<sup>69</sup> pokazanych na rys 4.



Rys. 4. Rury izolowane próżniowo (Vacuum Insulated Tubing – VIT), 1 – złączka, 2 – zewnętrzna rura stalowa, 3 – wewnętrzny izolator sprzęgający i spaw, 4 – wewnętrzna rura stalowa, 5 – próżnia z materiałem gettera<sup>70</sup>

<sup>64</sup> Sapińska-Śliwa A., Gonet A., Śliwa T., *Możliwości pozyskania i wykorzystania ciepła geotermalnego w Kopalni Soli Wieliczka* (Possibilities of acquiring and use geothermal heat from the Salt Mine Wieliczka), Aktualne problemy geotermiczne Polski, praca zbiorowa, red. S. Downorowicz, Towarzystwo Konsultantów Polskich, Oddział Lubin, Lubin 2018, s. 143–157.

<sup>65</sup> Śliwa T., Nowosiad T., Vityaz O., Sapińska-Śliwa A., *Study on...*, op. cit., s. 9.

<sup>66</sup> Sapińska-Śliwa A., Rosen M.A., Gonet A., Śliwa T., 2016, *Deep borehole...*, op. cit., s. 19.

<sup>67</sup> Haehnlein S., Bayer P., Blum P., *International legal...*, op. cit., s. 7.

<sup>68</sup> Morita K., Matsubayashi O., Kusunoki K., *Down-hole coaxial heat exchanger using insulated inner pipe for maximum heat extraction*, Geothermal Resources Council Transactions 1985, vol. 9/1, s. 45-50.

<sup>69</sup> Śliwa T., Kruszewski M., Zare A., Assadi M., Sapińska-Śliwa A., *Potential application of vacuum insulated tubing for deep borehole heat exchangers*, Geothermics 2018, vol. 75, s. 58–67 [PW-3].

<sup>70</sup> Na podstawie HELIX Oilfield Services ([www.helixoil.com](http://www.helixoil.com)).

## Modelowanie temperatury wierzchnich warstw górotworu

Ocena efektywności energetycznej głębokich otworowych wymienników ciepła jest wyjątkowo trudnym zadaniem. Jednym z istotnych zagadnień są straty ciepła do górotworu z przestrzeni pierścieniowej. Wystąpią one, gdy zatłaczany będzie nośnik ciepła, którego temperatura będzie wyższa niż temperatura wierzchnich warstw górotworu. Dopiero od pewnej głębokości, kiedy temperatura górotworu odpowiednio wzrośnie, zgodnie z gradientem geotermicznym, przepływ ciepła zmienia kierunek<sup>71</sup>.

Dla oceny strat ciepła wykonywałam liczne modelowania zachowania się temperatury wierzchnich warstw górotworu<sup>72</sup>. Do najistotniejszych parametrów należą czynniki meteorologiczne<sup>73</sup>.

Badania bazujące na modelowaniu numerycznym zakładały, że górotwór składa się z kilku warstw litologicznych o różnych miąższościach. Szczegółowe informacje na temat właściwości analizowanych warstw zestawiono na podstawie danych literaturowych<sup>74</sup>. Zakładając zmiany właściwości termofizycznych na powierzchni wraz z głębokością górotworu, niestacjonarność zjawisk, przepływ wód podziemnych (adwekcję) i zmiany faz wody, równanie transportu ciepła w kartezjańskim układzie współrzędnych posiada następującą formę:

$$\rho_z c_{pz} \left( \frac{\partial T}{\partial t} + U_x \frac{\partial T}{\partial x} + U_y \frac{\partial T}{\partial y} + U_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k_z \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + s \quad (8)$$

gdzie  $\rho_z$ ,  $c_{pz}$ ,  $k_z$  oraz  $s$  to odpowiednio średnia gęstość,  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , ciepło właściwe,  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , przewodność cieplna,  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , na głębokości  $z$ , natomiast  $s$  oznacza parametr źródłowy wynikający ze zmian fazy.

Równanie bilansu energetycznego górnej powierzchni Ziemi zależy od rozważanego modelu i może być zapisane ogólnie, w następujący sposób:

$$T(x, y, z, t) = f(t) \quad (9)$$

Analizy numeryczne uwzględniały wszystkie kluczowe zjawiska atmosferyczne. Zgodnie z odpowiednimi metodami wymiany ciepła, bilans strumienia ciepła dla powierzchni ziemi można zapisać jako:

$$q_{tot} = \max(q_{con1}, q_{con2}) + q_{sol} + q_{ter} + q_{pre} + q_{eva} \quad (10)$$

gdzie:

$q_{con1}$  – strumień ciepła wymieniany przez swobodną konwekcję,  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,  
 $q_{con2}$  – strumień ciepła wymieniany przez wymuszoną konwekcję,  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,  
 $q_{sol}$  – strumień ciepła związany z promieniowaniem słonecznym,  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,  
 $q_{ter}$  – strumień ciepła związany z promieniowaniem cieplnym Ziemi,  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,  
 $q_{pre}$  – strumień ciepła doprowadzony do ziemi z opadem,  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,  
 $q_{eva}$  – strumień ciepła związany z odparowaniem wody,  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ .

<sup>71</sup> Kujawa T., Nowak W., Thermal calculations of geothermal heat utilising one-well systems with injection and production, *Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan 2000*, 28.05-10.06.2000, s. 3483-3488.

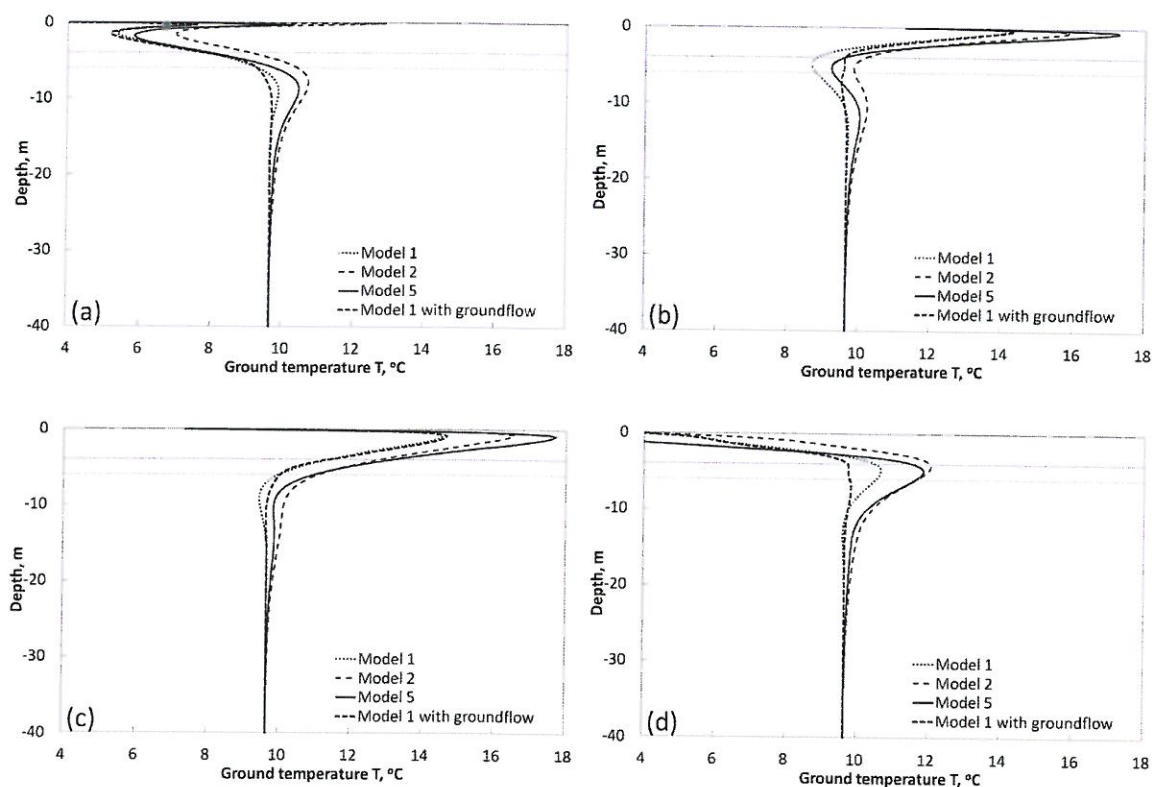
<sup>72</sup> Jaszczur M., Polepszyc I., Sapińska-Słiwa A., Gonet A., An analysis of the numerical model influence on the ground temperature profile determination, *Journal of Thermal Science* 2017, vol. 26 no. 1, s. 82–88 [PW-6].

<sup>73</sup> Jaszczur M., Polepszyc I., Sapińska-Słiwa A., Numerical analysis of the boundary conditions model impact on the estimation of heat resources in the ground, *Polish Journal of Environmental Studies* 2015, vol. 24 no. 5A, s. 60–66 [PW-13].

<sup>74</sup> Somerton W.H., Thermal properties and temperature-related behavior of rock/fluid systems, Elsevier, Amsterdam, 1992.

Temperatura gruntu jest wskaźnikiem zasobów geotermalnych w górotworze. W moich badaniach przeanalizowano różne modele wymiany ciepła ziemia-środowisko powierzchniowe pod kątem ich przydatności do systemów modelowania z wymiennikami otworowymi i geotermalnymi pompami ciepła<sup>75</sup>. Na podstawie średniej temperatury górotworu obliczano wartość efektywności (COP) dla pompy ciepła działającej w oparciu o idealny cykl Linde'a. Osiągnięta wartość COP wynosi około 5.8. Wartości COP uzyskane za pomocą zastosowanych modeli pokrywają się bardzo wysoko, niezależnie od litologii warstw. Inne modele nie doceniają lub znacznie przeceniają COP w porównaniu z najbardziej zaawansowanym modelem zastosowanym w analizie.

Zmienność temperatury wierzchnich warstw skorupy ziemskiej na podstawie zastosowanych modeli<sup>76</sup> przedstawiono na rys. 6. Jak widać, zmiany temperatury naturalnej górotworu mają wpływ na efektywność pompy ciepła, która pozyskiwać może ciepło o różnych temperaturach, zależnie od pory roku, ale również innych parametrów, jak np. obciążenie grzewcze.



Rys. 6. Temperatura wierzchnich warstw górotworu w wybranych miesiącach, (a) marzec, (b) czerwiec, (c) wrzesień, (d) grudzień<sup>77</sup>

<sup>75</sup> Jaszczur M., Polepszyc I., Biernacka B., Sapińska-Słiwa A., A numerical model for ground temperature determination, *Journal of Physics. Conference Series* 2016, vol. 745 art. no. 032007, s. 1–8, 7<sup>th</sup> Proceedings European Thermal-Sciences Conference (Eurotherm), 19–23 June 2016, Krakow, Poland [PW-10].

<sup>76</sup> Ibidem.

<sup>77</sup> Jaszczur M., Polepszyc I., Sapińska-Słiwa A., Numerical analysis..., op. cit., s. 21.

## Pozyskanie minerałów z wód geotermalnych

Przykładem innego kierunku działań nad wzrostem efektywności (ekonomicznej) w geotermii są badania, jakie prowadziłam nad możliwościami pozyskania składników mineralnych zawartych w wodach geotermalnych<sup>78</sup>. Obecnie wody takie, poza dostarczaniem ciepła, powszechnie zaczynają być wykorzystywane w celach balneologicznych i rekreacyjnych. Obecność soli mineralnych w wydobywanych wodach może być użyteczna pod kątem wykorzystania w balneoterapii (np. kąpiele solankowe, inhalacje) i kosmetyce<sup>79</sup>. Jednocześnie wody o wysokiej mineralizacji są kłopotliwe w eksploatacji ze względu na silne właściwości korozyjne i wytrącanie wtórnych minerałów w odwiertach oraz na elementach instalacji ciepłowniczej. Techniki takie jak odwrócona osmoza<sup>80</sup>, ultrafiltracja, elektrodializa, elektrokoagulacja czy ewaporacja, stosowane w procesie odsalania wody morskiej i oczyszczania wód, można zastosować również do pozyskiwania minerałów z wód geotermalnych oraz solanek odpadowych z procesu ich odsalania.

Analizowałam składy wód geotermalnych w Polsce eksploatowanych dla potrzeb ciepłownictwa, rekreacji i balneologii pod kątem pozyskiwania minerałów użytecznych<sup>81</sup>. Zajmowałam się również doбором odpowiednich technik umożliwiających pozyskiwanie związków chemicznych rozpuszczonych w wodach.

Pozyskiwanie minerałów z wód geotermalnych posiada wiele zalet. W porównaniu z tradycyjnymi metodami górnictwymi, taki sposób wydobywania minerałów użytecznych jest zdecydowanie mniej inwazyjny i nie powoduje znacznych szkód w środowisku. Prace górnictwowe, jakie należy wykonać, aby móc pozyskiwać minerały z wód geotermalnych, sprowadzają się do odwiercenia otworu eksploatacyjnego, podczas gdy tradycyjna eksploatacja rud minerałów wymaga nieustannego urabiania skał. Możliwość wykorzystania istniejących ciepłowniczych instalacji geotermalnych do pozyskiwania minerałów eliminuje konieczność wykonywania nowych wyrobisk otworowych. Pozyskiwanie minerałów z wód geotermalnych pozwala zaoszczędzić do 70% energii, jaką należałoby zużyć w konwencjonalnych procesach górnictwowych<sup>82</sup>.

Analizując wody geotermalne pod kątem pozyskiwania minerałów należy wziąć pod uwagę przede wszystkim mineralizację wód i wydajność otworu/doubletu geotermalnego. Wody z których obecnie pozyskuje się minerały posiadają wysoką mineralizację a przede wszystkim wysoką zawartość konkretnego składnika.

<sup>78</sup> Sapińska-Śliwa A., Dudek M., Wiśniowski R., Jaszczur M., Śliwa T., Pozyskiwanie surowców mineralnych z wód termalnych w Polsce (Applicability of geothermal waters in Poland to recovering the raw materials), *Przemysł Chemiczny* 2016, vol. 95 iss. 8, s. 1524–1528 [PW-12].

<sup>79</sup> Sapińska-Śliwa A., Grzeźlińska E., Gonet A., Możliwości wykorzystania wody termalnej z Uniejowa w formułach kosmetycznych, *Technika Poszukiwań Geologicznych Geotermia, Zrównoważony Rozwój* 2009, nr 2, s. 111-121.

<sup>80</sup> Tomaszewska B., Utylizacja schłodzonych wód termalnych Problemy i propozycje rozwiązań alternatywnych (Disposal of cooled geothermal water. Problems and alternatives proposition), *Technika Poszukiwań Geologicznych Geotermia, Zrównoważony Rozwój* 2013, No. 1, s. 91-102.

<sup>81</sup> Sapińska-Śliwa A., Efektywność pozyskiwania..., op. cit., s. 7.

<sup>82</sup> Patterson M., Geothermal brines - high value mineral extraction, International Mineral Extraction Conference, Tuscon, USA 2006.

Technologie odzysku minerałów z wód geotermalnych opierają się na krystalizacji, wytrącaniu i adsorpcji, co uzyskuje się poprzez zmianę temperatury, ciśnienia, pH, stosunków jonowych, działanie środków utleniających lub aktywnych sorbentów<sup>83</sup>.

Ogólny schemat pozyskiwania minerałów z wód geotermalnych można przedstawić następująco<sup>84</sup>:

- wstępne oczyszczenie wydobytych wód z makrocząstek;
- zateżnienie roztworu, np. przez ewaporację, odwróconą osmozę lub elektrodializę;
- wymuszenie krystalizacji lub strącania pożądaných składników;
- wydzielenie produktu z zateżnionego roztworu i suszenie.

Wody geotermalne, również te wykorzystywane w celu produkcji ciepła, od dawna stosowane są w celach balneologicznych i uzdrowiskowych. Do oceny wód pod kątem ich przydatności do celów terapeutycznych należy wziąć pod uwagę takie czynniki jak temperatura, mineralny skład ilościowy i jakościowy, obecność organizmów żywych czy odnawialność zasobów. Istotnym czynnikiem decydującym o możliwości wykorzystania wód w celach balneologicznych jest niezmiennosc ogólnej mineralizacji wód w czasie ich eksploatacji<sup>85</sup>. W balneologii można wykorzystać zarówno wody geotermalne, jak i pozyskane z nich sole<sup>86</sup>.

Polskie wody geotermalne wykorzystywane w celach energetycznych są równocześnie w wielu przypadkach zagospodarowywane w balneologii i rekreacji. Mogą posłużyć również w celach pozyskania surowców mineralnych, szczególnie w zakresie soli czy też pozyskania pierwiastków, np. litu. Korzyści finansowe przy tego typu eksploatacji należy upatrywać raczej w zmniejszeniu kosztów eksploatacji dzięki usunięciu korozyjnych i łatwo strącających się składników, niż w sprzedaży pozyskanych surowców. Innym źródłem zysku mogłaby być sprzedaż oczyszczonych wód do celów bytowych lub wykorzystanie ich do produkcji, np. kosmetyków i lekarstw, zaś otrzymane w wyniku oczyszczania sole mogłyby być przydatne dla balneologii.

## Podsumowanie i najważniejsze osiągnięcia naukowe

Prace badawczo-naukowe mojego autorstwa i współautorstwa wpisują się w szeroko pojętą efektywność w geoenergetyce. Moja aktywność naukowa dotyczyła poprawy efektywności energetycznej, a tym samym również efektywności ekonomicznej i ekologicznej. Dominującą rolę stanowią zagadnienia redukcji strat ciepła podczas przepływu wód geotermalnych w otworze oraz poprawy wymiany ciepła w wymiennikach otworowych.

Do najważniejszych osiągnięć dorobku naukowego zaliczam:

- nowe klasyfikacje w geoenergetyce opierające się na sposobie udostępniania i pozyskiwania ciepła;
- nowe receptury zaczynów uszczelniających/wypełniających o podwyższonym przewodnictwie cieplnym po stwardnieniu do otworowych wymienników ciepła;

<sup>83</sup> Dzieniewicz M., *Możliwości wykorzystania wód geotermalnych jako surowca do produkcji jodu, bromu i innych pierwiastków*, Konf. "Możliwości wykorzystania wód geotermalnych w Polsce ze szczególnym uwzględnieniem synklinorium Mogileńsko-Łódzkiego", Ślesin k. Konina, 26-27 października 1990, pp. 265-269.

<sup>84</sup> Sapińska-Śliwa A., Dudek M., Wiśniowski R., Jaszczur M., Śliwa T., *Pozyskiwanie surowców...*, op. cit., s. 23.

<sup>85</sup> Sapińska-Śliwa A., *Technologiczne i ekonomiczne zagadnienia zagospodarowania wody termalnej na przykładzie Uniejowa*, Wydawnictwa AGH, Kraków 2010, s. 166.

<sup>86</sup> Sapińska-Śliwa A., Śliwa T., Knez D., Gonet A., Wiśniowski R., *Selected aspects...*, op. cit., s. 11..



- nowe receptury zaczynów uszczelniających o obniżonym przewodnictwie cieplnym do nowych produkcyjnych otworów geotermalnych;
- liczne rozszerzone interpretacje wykonanych w Polsce testów reakcji termicznej;
- weryfikację przydatności nowego sposobu wyznaczania podstawowych parametrów z testu reakcji termicznej; zweryfikowanie dwóch metod interpretacji TRT na korzyść metody tradycyjnej, na podstawie licznych poszerzonych interpretacji TRT;
- propozycję nowych konstrukcji otworów naftowych (ropnych, gazowych i poszukiwawczych) pod kątem możliwości ich wykorzystania dla geoenergetyki w przyszłości;
- opracowanie receptur zaczynów uszczelniających z dodatkiem diatomitu o obniżonym przewodnictwie po stwardnieniu dla nowych otworów naftowych, gdzie występują perspektywiczne poziomy wodonośne (geotermalne);
- opracowanie receptur zaczynów uszczelniających z dodatkiem grafitu o podwyższonym przewodnictwie po stwardnieniu dla nowych otworów naftowych (ropnych, gazowych i poszukiwawczych), gdzie brak poziomów wodonośnych ale istnieją perspektywy przekwalifikowania wyrobisk na płytke otworowe wymienniki ciepła;
- opracowanie modyfikowanych receptur zaczynów uszczelniających dla nowych głębokich otworów naftowych (ropnych, gazowych i poszukiwawczych), gdzie brak perspektywicznych poziomów wodonośnych, ale istnieje możliwość adaptacji w przyszłości na głębokie otworowe wymienniki ciepła;
- zastosowanie receptury zaczynu uszczelniającego z grafitem w jednym z otworowych wymienników na terenie AGH (nr 14 w tabeli 1), służącego do ogrzewania i klimatyzacji pawilonu S1;
- zastosowanie nowych konstrukcji otworowych wymienników ciepła dla Laboratorium Geoenergetyki WwNiG AGH wg tabeli 1.

Tabela 1. Konstrukcje nowych otworowych wymienników ciepła Laboratorium Geoenergetyki WwNiG AGH wykonanych w 2017 r.

Nr otworu	Konstrukcja wymiennika	Rodzaj rury	Uszczelnienie
1	2 x U $\phi$ 32	Rura tradycyjna (laminarna)	TermorotaS
2	1 x U $\phi$ 32	Turbocollector	TermorotaS
3	2 x U $\phi$ 32	Turbocollector	TermorotaS
4	2 x U $\phi$ 32	Turbocollector	TermorotaS
5	1 x U $\phi$ 40	Rura tradycyjna (laminarna)	TermorotaS
6	1 x U $\phi$ 40	Turbocollector	TermorotaS
7	1 x U $\phi$ 45	Turbocollector	TermorotaS
8	1 x U $\phi$ 32	Turbocollector + dystansery	TermorotaS
9	1 x U $\phi$ 32	Turbocollector	20 m od góry TermorotaS
10	1 x U $\phi$ 40 3 rury (2+1)	Turbocollector	TermorotaS
11	1 x U $\phi$ 40 3 rury (2+1)	Turbocollector	Zaprawa
12	1 x U $\phi$ 32	Turbocollector	Cement
13	Pierwsza U-rurka: - $\phi$ 32 – Turbocollector - $\phi$ 40 – Turbocollector Druga U-rurka: - $\phi$ 32 – Rura tradycyjna (laminarna) - $\phi$ 40 – Rura tradycyjna (laminarna)		TermorotaS
14	1 x U $\phi$ 32	Turbocollector	TermorotaS z grafitem

Pozyskiwanie ciepła z górotworu może być realizowane na wiele sposobów. Na podstawie wyników moich badań i analiz można stwierdzić, że zastosowanie zróżnicowanych konstrukcji otworów wiertniczych do udostępnienia ciepła z górotworu charakteryzuje się różną efektywnością energetyczną.

Otwory naftowe z reguły są wiercone często na terenach słabo zamieszkanym. Postępująca urbanizacja powoduje jednak, że wiele starych otworów znajduje się obecnie na terenach średnio- i gęsto zaludnionych, np. na Podkarpaciu, czy na Ukrainie Zachodniej. Jednym z najistotniejszych warunków efektywności ekonomicznej inwestycji geotermalnych jest jej wykorzystanie lokalne, w niedalekiej odległości od otworów.

Wyeksploatowane otwory naftowe mogą i powinny w przyszłości, przy istniejących odbiorcach ciepła/chłodu, być wykorzystane do pozyskiwania ciepła Ziemi. Jeżeli otwory takie przewierciły perspektywiczne warstwy wodonośne, powinny być zaadaptowane na otwory geotermalne. Jeśli nie występują warstwy wodonośne w profilu geologicznym, otwory mogą pracować w formie otworowych wymienników ciepła.

Niektóre nowoprojektowane otwory ropne i gazowe, jak też poszukiwawcze i inne, mogą i powinny być wykonane w taki sposób, aby poprawić ich potencjalną możliwość wykorzystania w przyszłości na potrzeby geoenergetyki. Dotyczy to zarówno otworów mogących eksploatować wody geotermalne, jak też tych, które mogłyby zostać wykorzystane jako otworowe wymienniki ciepła.

Modyfikowane zaczyny uszczelniające/wypełniające mogą w otworach geotermalnych zredukować straty ciepła z wody przy jej przepływie z warstwy wodonośnej ku powierzchni. Jeśli zastosuje się receptury zaczynów, które po stwardnieniu mają niskie przewodnictwo cieplne, można zredukować straty ciepła o wartościach liczonych nawet w megawatach na otwór.

Jeśli w potencjalnych głębokich otworowych wymiennikach ciepła na bazie otworów naftowych zastosuje się modyfikowane zaczyny uszczelniające, można również poprawić ich efektywność energetyczną. Zaczyny o obniżonym przewodnictwie w górnej części otworu zredukują straty z nośnika ciepła do górotworu, jeśli temperatura wprowadzanego nośnika będzie wyższa od temperatury górotworu (przy pracy w trybie grzewczym). Natomiast zaczyny o podwyższonej przewodności umożliwią lepszą wymianę ciepła w dolnej części głębokich otworowych wymienników ciepła w wyniku redukcji oporności termicznej.

Uważam, że prace badawcze związane z modyfikowanymi recepturami zaczynów uszczelniających na WWNiG AGH powinny być dalej rozwijane. W tradycyjnych otworowych wymiennikach ciepła powinno się stosować zaczyny uszczelniające/wypełniające, które po stwardnieniu mają wysoką przewodność cieplną, pamiętając o tym, iż zagraniczne mieszaniny (o przewodnictwie  $3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) są bardzo kosztowne.

Na podstawie prostych obliczeń określono, że średnia wydajność wody z otworu geotermalnego w Polsce wynosi  $\dot{V}=138 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , a średnia potencjalna efektywność energetyczna (przy schłodzeniu wody do temperatury  $5^\circ\text{C}$ ) wynosi  $P=9,64 \text{ MW}$ . Roczna potencjalna produkcja ciepła, przy założeniu pełnego stałego obciążenia, jest równa  $Q=304 \text{ TJ}$  na otwór. Przyjmując ekwiwalent energii w jednej baryłce ropy równy  $6,12 \text{ GJ} \cdot \text{bbl}^{-1}$ , otrzymuje się roczny ekwiwalent ropy z otworu o wartości prawie 50 tys. bbl ( $7950 \text{ m}^3$ ) na otwór. Należy jednak pamiętać, że pozyskanie obliczonej ilości ciepła, do wykorzystania wymaga dostarczenia energii napędowej dla pompy ciepła, celem dostosowania ciepła do wymagań układu odbiorczego.

Płytkie otwory, pracujące jako otworowe wymienniki ciepła, mogą mieć większą efektywność przy zastosowaniu zaczynów o podwyższonej przewodności, zwłaszcza w przypadkach szczytowych obciążeń pomp ciepła. Jedynie w przypadku głębokich wymienników otworowych możliwe jest bezpośrednio wykorzystanie ciepła, bez wsparcia pomp ciepła.

Wykorzystywanie starych otworów do celów geoenergetycznych uważam tylko za kwestię czasu. Już obecnie możemy przyczynić się do ich lepszej efektywności (z wykorzystaniem np. grafenu) jako potencjalnych otworów pełniących różne funkcje w geoenergetyce.

Otrzymane wyniki wskazują na dalsze możliwości rozwoju przedstawionych przeze mnie rozwiązań i ich zastosowania praktyczne.

#### **IV. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych**

##### **Pozostałe najważniejsze osiągnięcia naukowo-badawcze (przed uzyskaniem stopnia doktora)**

Po ukończeniu studiów magisterskich rozpoczęłam pracę w Wojewódzkim Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej w Łodzi. Jestem autorką wstępnej koncepcji zagospodarowania wody geotermalnej dla Uniejowa wykonanej w 1999, w której przedstawiłam szczegółową analizę energetyczną dla miasta z propozycją zagospodarowania wody i jej energii. Od początku mojego zatrudnienia w funduszu zajmowałam się koordynacją prac związanych z udostępnianiem złoża geotermalnego w Uniejowie oraz wykonaniem systemu ciepłowniczego na terenie miasta Uniejów. W ramach tego zadania koordynowałam również prace związane z rekonstrukcją otworu Uniejów PIG/AGH-1 (otworu chłonnego), którego uruchomienie determinowało pracę systemu geoenergetycznego. Praca ta wzbogaciła znacznie moją wiedzę praktyczną. Zdobyłam ogromne doświadczenie praktyczne w zakresie udostępniania i wykorzystania energii geotermalnej.

W latach 2001-2002 byłam stypendystką Rządu Republiki Francuskiej. Ukończyłam studia podyplomowe w Wyższej Szkole Technicznej i Górniczej w Alès we Francji (École Nationale Supérieure des Techniques Industrielles et des Mines d'Alès) na kierunku Środowisko i Bezpieczeństwo. Wykonałam pracę dyplomową z zakresu termicznej utylizacji odpadów. Ukończyłam te studia z najlepszą notą.

Od roku 2005 pracowałam w Stowarzyszeniu Gmin Polska Sieć „Energie Cités” w Krakowie, gdzie kierowałam i byłam wykonawcą kilku projektów finansowanych z UE oraz polskich środków budżetowych. Projekty te dotyczyły zagadnień energetycznych, szczególnie energetyki odnawialnej.

Byłam w tym czasie autorką lub współautorką 17 publikacji, w tym dwóch poradników m.in. poradnika pt. *Odnawialne źródła energii Małopolsce*, a także *Atlasu zasobów geotermalnych na Niżu Polskim*, licznych artykułów dotyczących wykorzystania energii geotermalnej. Uczestniczyłam w konferencjach krajowych i międzynarodowych (np. w roku 2003 brałam udział w International Geothermal Conference w Rejkjawiку na Islandii, gdzie wygłosiłam referat pt. „*The effects of developing the geothermal energy in Uniejów town*”), kongresach (współautorka referatów pt. „*Geothermal conditions of the Łódź Synclinorium Early Cretaceous reservoir*”; „*Use the wells of historic cradle of the world's oil industry for geothermal purposes*” wygłoszonych podczas *European Geothermal Congress w Unterhaching w Niemczech*), w szkoleniach jako wykładowca, gdzie prezentowałam referaty z zakresu energetyki geotermalnej.

W latach 2005-2009 uczestniczyłam w studiach doktoranckich na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH. W latach 2008-2009 byłam wykonawcą grantu dziekańskiego przyznanego przez Komitet Badań Naukowych pn. „Wybrane zagadnienia technologiczno-ekonomiczne wykorzystania wody termalnej w Uniejowie”, którego wyniki stanowiły istotny wkład w moją pracę doktorską. W celu zebrania wiarygodnych danych z innych krajów europejskich ściśle związanych naukowo z problematyką pozyskania i wykorzystania energii geotermalnej a także w celu analizy już otrzymanych wyników pracy, odbyłam w 2007 r. trzy staże przemysłowe, a mianowicie w *Geoproduction Consultants Instrumentation Process* w Paryżu (Francja), w *Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM)* Orléans (Francja) oraz w przedsiębiorstwie *Fiberglas Tubes & Services GmbH* w Nienhagen w Niemczech.

Od roku 2008 uczestniczyłam czynnie w powstawaniu i wyposażaniu na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, nowego - również w skali innych uczelni w Polsce - Laboratorium Geoenergetyki. W jego skład wchodzi m.in. zestaw pięciu otworowych wymienników ciepła o różnej konstrukcji i różnym sposobie uszczelnienia. Każdy o głębokości 78 m. Pozwala to na przeprowadzanie *in-situ* badań efektywności energetycznej pozyskanego ciepła z górotworu, przy różnych warunkach pogodowych (w tym szczególnie temperatur zewnętrznych). Laboratorium wyposażone jest w zestaw do badania przewodnictwa cieplnego oraz inne urządzenia pozwalające na wykonywanie badań naukowych z zakresu geoenergetyki. Laboratorium zostało również wyposażone w pięć kolektorów słonecznych o różnej konstrukcji, pozwalających rozszerzyć badania o podziemne magazynowanie energii. Pierwsze badania laboratoryjne były możliwe dzięki mojemu udziałowi jako wykonawcy w projekcie badawczym nr R009 005 03 pn. „*Metodyka identyfikacji potencjału cieplnego górotworu wraz z technologią wykonywania i eksploatacji otworowych wymienników ciepła*”. Projekt ten był realizowany na AGH w latach 2008-2011. Wyniki prac zostawały zawarte w monografii, a także prezentowane na Światowym Kongresie Geotermalnym w 2010 r. już po obronie doktoratu. Z dniem 2 listopada 2009 r. rozpoczęłam pracę w Katedrze Wiertnictwa i Geoinżynierii na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie.

### **Pozostałe najważniejsze osiągnięcia naukowo-badawcze (po uzyskaniem stopnia doktora)**

Po uzyskaniu stopnia naukowego doktora nauk technicznych kontynuowałam pracę w Katedrze Wiertnictwa i Geoinżynierii na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH najpierw jako asystent, a następnie od 2010 roku, jako adiunkt.

Od początku mojej pracy na uczelni związana byłam z działalnością nowopowstałego, Laboratorium Geoenergetyki na macierzystym Wydziale. Moja praca naukowa koncentrowała się na zagadnieniach związanych z badaniem efektywności energetycznej pozyskania ciepła z górotworu przy pomocy różnej konstrukcji otworowych wymienników ciepła. Od roku 2009 r. brałam udział w opracowaniu wielu analiz geoenergetycznych dla instalacji przemysłowych w różnych miejscach w Polsce. Ze względu na możliwość interpretacji testów reakcji termicznej (TRT) dla bardzo zróżnicowanych przekrojów litologicznych, przy zmiennych głębokościach otworowych wymienników ciepła, różnych użytych materiałach uszczelniających a także zmiennych warunkach atmosferycznych (szczególnie w zakresie zmian temperatury powietrza) zebrano unikalny zestaw danych wyników badań. Ciekawym aspektem poznawczym było także zastosowanie w różnych instalacjach wody, glikolu bądź alkoholu jako nośnika ciepła.

Wyniki badań *in-situ* 23 otworowych wymienników ciepła zostały szeroko przedstawione w monografii pn. *Efektywność pozyskania ciepła z górotworu w aspekcie sposobu udostępnienia otworami wiertniczymi* stanowiącej wkład w osiągnięcie naukowe habilitantki.

W latach 2010-2011 brałam udział w projekcie pn. *„Metodyka określania możliwości magazynowania ciepła odpadowego w górotworze na potrzeby weryfikacji energetycznej obiektów wraz z wprowadzeniem systemu certyfikacji ekologicznej obiektów na podstawie procedury BREEAM”*, w którym byłam jego wykonawcą. W projekcie wykonałam narzędzie komputerowe do szacowania wielokryterialnej oceny budynku na podstawie systemu brytyjskiego BREEAM (wraz z użyteczną instrukcją) oraz metodykę określania możliwości magazynowania ciepła odpadowego w górotworze w ramach weryfikacji energetycznej obiektów i poprawy efektywności. W programie komputerowym zawarłam 10 zagadnień tematycznych (w tym m.in. zarządzanie procesem, gospodarka odpadami, racjonalne zarządzanie energią, gospodarka wodą użytkową oraz ściekami, użyte materiały budowlane, ekologia i wpływ na środowisko, emisja zanieczyszczeń). Takie narzędzie komputerowe stworzyło możliwość jego wykorzystania w polskim systemie certyfikacji budynków. Narzędzie to stanowi dobre uzupełnienie wykonywanych obecnie przez akredytowanych audytorów certyfikatów energetycznych.

Moja wiedza naukowa i doświadczenie zostały wykorzystane w działalności eksperckiej. Przykładem może być umowa z Generalną Dyrekcją Ochrony Środowiska w Warszawie. Wykonałam prezentację na temat *„Możliwości zastosowania i kierunki rozwoju eksploatacji złóż wód geotermalnych w województwie łódzkim ze szczególnym uwzględnieniem Miasta i Gminy Uniejów”* w ramach projektu pn. *Wsparcie funkcjonowania sieci organów środowiskowych i instytucji zarządzających funduszami unijnymi „Partnerstwo: Środowisko dla Rozwoju”*.

Kolejne badania naukowe wykonane w Laboratorium Geoenergetyki związane były z realizacją projektu badawczego nr N N524 353738 pn. *„Opracowanie zintegrowanego systemu otworowych wymienników ciepła i kolektorów słonecznych w aspekcie poprawy efektywności gospodarowania ciepłem w górotworze”*, który był realizowany w latach 2011-2012. Moje badania obejmowały wykonanie pomiarów efektywności podziemnego magazynowania ciepła pozyskiwanego za pośrednictwem kolektorów słonecznych.

Równolegle kontynuowałam badania związane z pozyskiwaniem ciepła i jego wykorzystaniem za pomocą otworów geotermalnych. Na uwagę zasługują moje koncepcje dwóch projektów (kierownik projektów w latach 2012-2013) i późniejsza ich realizacja w zespole międzynarodowym. Pierwszy z projektów dotyczył wykorzystania wód geotermalnych na terenie ukraińskiego Zakarpacia. Drugi obejmował analizy możliwości zastosowania otworowych wymienników ciepła w skali przemysłowej na terenie zachodniej Ukrainy. W badaniach partnerem był Ivano-Frankivsk Technical University of Oil and Gas. Oba te projekty związane były z analizą szeregu danych przemysłowych. Rezultatem obu projektów były koncepcje pozyskania ciepła z górotworu za pomocą otworów geotermalnych bądź otworowych wymienników ciepła.

W latach 2012-2013 byłam wykonawcą dwóch projektów skupionych na tematyce wykorzystania ciepła niskotemperaturowego z zastosowaniem pomp ciepła oraz na innowacyjnych technicznych rozwiązaniach w instalacjach geotermalnych. W 2012 r. współpracowałam z Przedsiębiorstwem Energetyki Ciepłej „Geotermia Podhalańska” SA W ramach projektu wykonałam wielowariantową analizę funkcjonowania hybrydowego źródła ciepła na bazie wód geotermalnych i gazu wraz z wykorzystaniem pomp ciepła (absorpcyjnej i sprężarkowych). Analiza ta miała na celu pokazanie najlepszych rozwiązań energetycznych dla zwiększenia udziału mocy

„geotermalnej” w ogólnym bilansie energetycznym. Dzięki własnej produkcji energii elektrycznej, w Przedsiębiorstwie Energetyki Ciepłej „Geotermia Podhalańska” SA, wytwarzanej przez generatory prądotwórcze, najkorzystniejszym rozwiązaniem energetyczno-ekonomicznym okazało się zastosowanie sprężarkowych pomp ciepła zasilanych z tych generatorów. Pompy ciepła mają za zadanie zaspokoić rosnące zapotrzebowanie na ciepło dla PEC Geotermia Podhalańska przy równoczesnym wykorzystaniu źródła ciepła o jak najniższym koszcie wytwarzania. Należy nadmienić, iż wyniki projektu przyczyniły się aktualnie do realizacji w praktyce zaproponowanej rozwiązania energetycznego.

W roku 2012 r. współpracowałam ze Spółką Tatra Termal Sp. zo.o W ramach projektu opracowałam innowacyjne rozwiązania dotyczące nowej technologii gospodarowania energią w kąpielisku. Polega ona na trójgeneracji, czyli skojarzonym wytwarzaniu energii elektrycznej, ciepła i chłodu. W opracowaniu uwzględniłam również zagadnienia wytrącania minerałów wraz z ich późniejszym wykorzystaniem zarówno w nieckach basenowych, jak też jako składniki do produkcji kosmetyków.

W latach 2014-2017 byłam wykonawcą oraz kierownikiem zadania (WP6) o nazwie „Optymalizacja organizacji prac wiertniczych oraz likwidacji otworów umożliwiająca obniżenie kosztochłonności wiercenia” w projekcie „*Optymalizacja parametrów wierceń, w tym dobór technologii wiercenia, narzędzi, płynów wiertniczych i cementowania otworów pionowych i horyzontalnych dla eksploatacji złóż gazu łupkowego*”, Akronim: OPTIDRILLTEC, który był finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju oraz PGNiG SA. W ramach projektu wykazałam, że otwory, które były wykonane w celach poszukiwawczych za gazem z łupków mogą być wykorzystane jako głębokie otworowe wymienniki ciepła. Otwory takie mogą równocześnie spełniać rolę monitorującą szczelność czy okazji pozyskiwania ciepła Ziemi. Kluczowym zagadnieniem jest konstrukcja takich wymienników. Zaproponowałam, aby były wykonywane w postaci wymienników współosiowych. Przepływ nośnika ciepła w takich wymiennikach realizowany jest w dół przestrzenią pierścieniową i ku powierzchni wnętrzem wewnętrznej kolumny centrycznej. Właściwości izolacyjne takiej kolumny mają kluczowe znaczenie ze względu na efektywność energetyczną wymienników. Kolumna musi umożliwić przepływ nośnika ciepła oraz izolować cieplnie przeciwbieżne strumienie o różnych temperaturach. Można w tym celu wykorzystać rury stosowane do wygrzewania złóż parą wodną, w których izolacyjność cieplną uzyskuje się za pomocą próżni pomiędzy dwoma rurami stalowymi. Rury takie są kosztowne i zajmują miejsce w przestrzeni otworu, ograniczając przepływ (zwiększone opory przepływu). Innym rozwiązaniem, który analizowałam w projekcie było zastosowanie tworzyw sztucznych pod kątem izolacyjności termicznej oraz wytrzymałości mechanicznej na wysokie ciśnienia.

W roku 2017 byłam koordynatorem (z ramienia WwNiG AGH) oraz wykonawcą projektu badawczego pt. „*Energia geotermalna podstawą nisko-emisyjnego ciepłownictwa, poprawy warunków życia i zrównoważonego rozwoju – wstępne studia dla wybranych obszarów Polski*”. Projekt był finansowany z Mechanizmu Finansowego Europejskiego Obszaru Gospodarczego 2009-2014 w ramach Funduszu Współpracy Dwustronnej. Mój wkład naukowo-badawczy również dotyczył efektywności energetycznej związanej z otworami wiertniczymi. Badania skupiały się na trzech lokalizacjach nowych otworów geotermalnych: w Sochaczewie, Konstanczynie Łódzkim i w Łądku Zdroju.

Ze względu na dość szerokie zainteresowania naukowe skupione wokół zagadnień dotyczących efektywności pozyskiwania ciepła z górotworu w aspekcie ich udostępnienia prowadząc swoje badania naukowe, podchodzę do rozwiązywania problemów w sposób interdyscyplinarny oraz zwracam uwagę na komplementarność prowadzonych badań, co jest możliwe dzięki znajomości różnorodnych metod analitycznych i numerycznych. Takie podejście zapewnia uzyskanie kompleksowych wyników badań w rozwiązywaniu problemów badawczych.

Po doktoracie wyniki moich badań były przedstawiane na 18 konferencjach międzynarodowych. Osobiście uczestniczyłam w 15 międzynarodowych konferencjach naukowych, na których prezentowałam referaty lub przedstawiałam postery.

Za swoje osiągnięcia naukowe otrzymałam trzy Rektorskie nagrody zespołowe: I-go stopnia za osiągnięcia naukowe w 2012 r., II stopnia za osiągnięcia naukowe w 2015 r. oraz także zespołową II stopnia za osiągnięcia naukowe w 2017 r. Rektorska Nagroda za Osiągnięcia Naukowe, zespołowa II stopnia za 2018 r. została pozytywnie zaopiniowana przez Radę Wydziału WNiG AGH.

Sumaryczny zestaw dorobku naukowego w latach 2009–2019 (po obronie doktoratu)

Rodzaj osiągnięcia	Samodzielnie	We współautorstwie	Razem
Publikacje w czasopismach z bazy JCR	0	8	8
Książki i monografie	2	10	12
Fragmenty książki	0	2	2
Publikacje naukowe w czasopismach nieposiadających współczynnika wpływu Impact Factor (IF)	0	31	31
Materiały konferencyjne zagraniczne	5	20	25
Materiały konferencyjne krajowe	0	1	1
<b>RAZEM</b>	<b>7</b>	<b>72</b>	<b>79</b>

Sumaryczny *impact factor*, liczba cytowań publikacji po doktoracie (na dzień 15.04.2019)

Baza danych	Liczba publikacji	Liczba cytowań	Indeks Hirscha
Web of Science	10	21	3
Scopus	11	32	3
Google Scholar	52	124	6

Zestawienie osiągnięć naukowo-badawczych na dzień 15.04.2019 r.

Lp.	Kryterium	Liczba
1.	Autorstwo lub współautorstwo publikacji naukowych w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (JCR)	8
2.	Sumaryczny impact factor publikacji naukowych według listy Journal Citation Reports (JCR), zgodnie z rokiem opublikowania	8,419
3.	Liczba cytowań wszystkich publikacji: - według bazy Web of Science, - według bazy Scopus - według bazy Google Scholar	21 32 124
4.	Indeks Hirscha wszystkich opublikowanych publikacji: - według bazy Web of Science - według bazy Scopus - według Google Scholar	3 3 6
5.	Autorstwo lub współautorstwo monografii	12
6.	Autorstwo lub współautorstwo rozdziałów w monografii	2
7.	Publikacje naukowe w czasopismach nieposiadających współczynnika wpływu Impact Factor (IF)	32
8.	Autorstwo lub współautorstwo atlasu	1
9.	Publikacje w materiałach z konferencji i seminariów międzynarodowych	30
10.	Publikacje w materiałach z konferencji krajowych	3
11.	Autorstwo lub współautorstwo książek	4
12.	Publikacje popularnonaukowe	4
13.	Referaty opublikowane w materiałach z konferencji krajowych	9
14.	Kierowanie międzynarodowymi projektami badawczymi lub udział w takich projektach.	3
15.	Kierowanie krajowymi projektami badawczymi lub udział w takich projektach	7
16.	Łączna liczba punktów za publikacje według MNiSW	556 (611 <sup>87</sup> )
17.	Prezentacje na międzynarodowych konferencjach tematycznych.	31
18.	Prezentacje na krajowych konferencjach tematycznych	14
19.	Nagrody Rektora za działalność naukową.	3

<sup>87</sup> Łączna liczba punktów MNiSW dla publikacji wydanych po doktoracie



## Działalność dydaktyczna

W mojej pracy dydaktycznej można wyróżnić kilka aktywności. Prowadzę zajęcia dydaktyczne w formie wykładów, ćwiczeń laboratoryjnych, audytoryjnych i projektowych, a także zajęcia seminaryjne i wyjazdy terenowe. Są to zajęcia dotyczące zarówno zagadnień inżynierskich z zakresu specjalności na Wydziale jak również zagadnień związanych z prawem, w tym szczególnie Prawem geologicznym i górnictwem, budowlanym, wodnym i energetycznym. Zajęcia kierowane są zarówno dla studentów stacjonarnych jak i niestacjonarnych. W latach 2009-2016 prowadziłam również zajęcia w Zamiejscowym Ośrodku Dydaktycznym AGH w Krośnie.

W okresie 2009-2018 prowadziłam zajęcia w ramach 15 modułów (bez uwzględnienia studiów podyplomowych), w tym 14 z nich również w formie wykładów. Dla studentów z Keilir Institute of Technology z Islandii prowadziłam również zajęcia w języku angielskim. Na potrzeby realizowanych przez mnie zajęć dydaktycznych opracowałam autorskie materiały dydaktyczne dla 10 modułów dydaktycznych. Dla studentów, stypendystów UNESCO prowadziłam zajęcia z zakresu udostępniania i wykorzystania energii geotermalnej.

Od 2010 roku byłam promotorem 20 prac magisterskich oraz 30 prac inżynierskich na studiach stacjonarnych (kierunek: *Górnictwo i Geologia* oraz *Inżynieria Naftowa i Gazownicza*). Obecnie jestem promotorem 8 prac magisterskich (w tym 2 na studiach niestacjonarnych). Jeden z wypromowanych przeze mnie dyplomantów prowadził badania w ramach studiów doktoranckich, a obecnie kontynuuje pracę naukową na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu.

Od 2009 r. prowadzę/prowadziłam zajęcia dydaktyczne na studiach dziennych oraz zaocznych na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu z następujących przedmiotów:

- *Wiercenia inżynierskie,*
- *Podstawy Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn,*
- *Mechanika skał i górotworu,*
- *Geoenergetyka,*
- *Geoinżynieria,*
- *Geoinżynieria II,*
- *Geotechnika,*
- *Gospodarka surowcami mineralnymi,*
- *Seminarium dyplomowe,*
- *Ochrona własności intelektualnej,*
- *Prawo geologiczne i górnicze, wodne i budowlane,*
- *Prawo autorskie, wodne i budowlane,*
- *Prawo geologiczne i górnicze, wodne, budowlane i energetyczne,*
- *Prawo geologiczne i górnicze i ochrona patentowa,*
- *BHP i ergonomia.*

Organizowałam i brałam czynny udział w wyjazdach terenowych dla studentów w ramach modułu *Geotechnika*. Prowadziłam również liczne zajęcia na studiach podyplomowych *Geoenergetyka i geoinżynieria*.

W roku 2016 otrzymałam Dyplom Uznania za wkład pracy w zakresie opieki nad stypendystami Centrum AGH UNESCO podczas realizacji w latach 2010-2015 projektu stypendialnego UNESCO/Polnad Co-Sponsored Fellowship Programme in Engineering ed. 2015A w obszarze nauk technicznych. Dyplom wydany przez Polski Komitet do spraw UNESCO (podpisany

przez Sekretarza Generalnego PK ds. UNESCO Prof. dr hab. inż. Sławomira Ratajskiego). Od roku 2013 sprawowałam opiekę merytoryczną nad 6 stypendystami z UNESCO.

Lista studentów stypendystów UNESCO pod moją opieką:

1. Baryana Apolinaire, Burundi (2016/2017)
2. Madhawa Jinasena, Sri Lanka (2015/2016)
3. Diarra Yacouba, Mali (2015/2016)
4. Alinanjia Lantoaridriaka, Madagaskar (2014/2015)
5. Eddie Mego, Papua Nowa Gwinea (2014/2015)
6. Ali Shoukri, Pakistan (2014/2015)

Natomiast od 2012 r. przyjął pod opiekę pięciu studentów w ramach organizacji IAESTE.

Studenci praktykanci z IAESTE

1. Gerardo Ortiz Gomez, Hiszpania, University of Cantabria, rok akademicki 2013/2014.
2. Carrick Chan, Chiny, Makao, University of Macao, Faculty of Science and Technology, rok akademicki 2014/2015.
3. Djordje Bjelajac, Bośnia i Hercegowina, University of Baja Luka, Faculty of Architecture, Civil Engineering and Geodesy, rok akademicki 2015/2016.
4. Emna Sahraoui, Tunezja, National Engineering School of Tunis, rok akademicki: 2016/17.

W roku akademickim 2015/2016 prowadziłam indywidualne wykłady w języku angielskim (m.in. przedmiot o nazwie *Drilling Fluids Chemistry*) dla studentów z Keilir Institute of Technology z Islandii.

Po doktoracie w ramach programu Erasmus+ (*Staff Mobility for Teaching*) prowadziłam trzykrotnie (2014, 2016 i 2018) wykłady w języku angielskim w TU Bergakademie Freiberg w Niemczech.

## **Działalność organizacyjna**

W latach 2012–2016 byłam członkiem Okręgowej Komisji Wyborczej Wydziału Wiertnictwa, Nafty i Gazu, a od 2014 r. Sekretarzem Komisji, w tym okresie byłam także przedstawicielem Wydziału do Kasy Zapomogowo-Pożyczkowej AGH.

W latach 2015–2016 byłam pełnomocnikiem Dziekana ds. współpracy z uczelniami w obszarze niemieckojęzycznym.

Od roku 2016 pełnię funkcję Prodziekana Wydziału ds. Studiów Stacjonarnych dla kierunku Górnictwo i Geologia (od października 2019 r. zmiana nazwy na Geoinżynieria i Górnictwo Otworowe) oraz Inżynierii Naftowej i Gazowniczej na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie. Byłam czynnie zaangażowana w opracowanie programu i uruchomienie nowej specjalności *Geoinżynieria i Geotermia* na studiach stacjonarnych II stopnia na kierunku *Górnictwo i Geologia*. Byłam zaangażowana w rozmowy z wybranymi spółkami prowadzącymi działalność w sektorze naftowym i gazowniczym, dotyczące praktyk i staży płatnych dla studentów i absolwentów WWNiG.

Od 2016 r. będąc pracownikiem Wydziału Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH uczestniczę w pracach:

- Wydziałowej Komisji Rekrutacyjnej gdzie pełnię funkcję Przewodniczącej;
- Wydziałowej Komisji Rekrutacyjnej ds. Studiów Doktoranckich, gdzie pełniłam funkcję Przewodniczącej w roku akademickiego 2016/2017;
- Wydziałowej Komisji ds. Kształcenia, gdzie pełnię funkcję Przewodniczącej;
- Wydziałowej Komisji Nostyfikacyjnej, gdzie pełnię funkcję Przewodniczącej;
- Jury konkursu Diamenty AGH, gdzie jestem Przewodniczącą Jury dla WWNiG;
- Komitetu Honorowej Szpady przy SITPNIG, w którym pracuję jako członek.

Na lata 2016-2020 zostałam również wybrana na Pełnomocnika Dziekana ds. Programu „Erasmus+”. W ramach tej funkcji organizuję i pomagam w wyjazdach zarówno studentów stacjonarnych i niestacjonarnych w wyjazdach na studia i praktyki, szczególnie do uczelni, z którymi WWNiG ma podpisaną umowę o współpracę jak również z innymi jednostkami zagranicznymi z nawiązaną współpracą przez inne Wydziały AGH. Jestem również odpowiedzialna za wyjazdy pracowników Wydziału na prowadzenie zajęć dydaktycznych (*ang. Staff Mobility for Teaching*) w innych uczelniach zagranicznych w ramach zawartych umów.

W roku 2018 r. monitorowałam pracę doktoranta WWNiG na Technical University of Crete, w Laboratorium Analizy Płynów Złożowych oraz Rdzeni (PVT & Core Analysis Laboratory) na Krecie w Grecji.

Anette Jędrzejko - Skłone

