

R E C E N Z J A

dorobku naukowo-badawczego, dydaktycznego i organizacyjnego dr inż. Jerzego Wołoszyna, w związku z postępowaniem o nadanie stopnia naukowego doktora habilitowanego w dyscyplinie *Mechanika*

Podstawą opracowania recenzji jest pismo Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki Akademii Górniczo-Hutniczej prof. dr hab. inż. Antoniego Kalukiewicza nr WIMR-b.511-10/19 z dnia 10 grudnia 2019 roku.

1. Sylwetka zawodowa Kandydata

Dr inż. Jerzy Wołoszyn, po uzyskaniu w 2004 roku dyplomu technika telekomunikacji w Technikum Łączności w Krakowie, podjął studia na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica (AGH). Ukończył je w 2009 roku otrzymując dyplom mgr inż. w specjalności: *Informatyka w Inżynierii Mechanicznej*.

W 2014 roku Rada Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH nadała Kandydatowi dyplom doktora nauk technicznych w dyscyplinie *Mechanika* na podstawie obrony rozprawy doktorskiej pt.: „Badania wpływu rozmieszczenia wymienników na efektywność podziemnych magazynów energii”, której promotorem był prof. dr hab. inż. Andrzej Gołaś.

Od 2010 roku Pan Doktor pracuje w Katedrze Systemów Energetycznych i Urządzeń Ochrony Środowiska na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH, początkowo na stanowisku asystenta, a od końca 2014 roku, bezpośrednio po obronie doktoratu, na stanowisku adiunkta w tej Uczelni.

W ramach doskonalenia zawodowego, Kandydat ukończył studium doskonalenia dydaktycznego dla pracowników i doktorantów AGH (2011) oraz szkolenie certyfikujące z zakresu prowadzenia zajęć z wykorzystaniem metod i technik kształcenia na odległość (Centrum e-Learningu AGH, 2016); uzyskał też Certyfikat CLAD – Certified LabVIEW Associate Developer (National Instruments, 2014).

2. Ocena rozprawy habilitacyjnej – osiągnięcia naukowego wskazanego do uzyskania stopnia naukowego

Jako główne osiągnięcie naukowe Kandydat wskazał autorską monografię pt.: „Wpływ parametrów materiałowych, konstrukcyjnych i eksploatacyjnych na efektywność podziemnego magazynowania energii termicznej”, opublikowaną przez Wydawnictwa AGH w 2019 roku, ISBN 978-83-06016-79-9.

Podjęta w niej tematyka dobrze wpisuje się w aktualną światową politykę energetyczną i związane z nią współczesne kierunki badań nad możliwościami szerszego, efektywnego i optymalnego wykorzystania energii ze źródeł odnawialnych, a także chwilowych nadwyżek energii i ciepła odpadowego, jako wspomagających zaspokojenie wciąż rosnącego zapotrzebowania na energię. Zmienność tego zapotrzebowania w czasie oraz losowy i sezonowy charakter źródeł energii odnawialnej wymagają efektywnych technologii magazynowania energii termicznej, a podziemne magazyny energii są obiecującym rozwiązaniem o istotnym znaczeniu praktycznym.

Rozprawa habilitacyjna jest podsumowaniem i próbą syntezy wyników wieloletnich badań i analiz prowadzonych przez Kandydata, a dotyczących optymalizacji parametrów materiałowych, konstrukcyjnych i eksploatacyjnych pasywnego gruntowego magazynu energii z otworowymi wymiennikami ciepła.

Obszerny zakres opisanych w monografii badań obejmuje: autorski model symulacyjny transportu masy i ciepła w wymienniku otworowym oraz w górotworze; szeroką analizę wpływu kilkunastu parametrów materiałowych, konstrukcyjnych i eksploatacyjnych na wielkość energii doprowadzonej i odzyskanej z magazynu oraz na efektywność termiczną procesu magazynowania; oryginalny model analityczny do szybkiej oceny efektywności podziemnego magazynu energii termicznej; analizę globalnej wrażliwości tej efektywności na zmiany parametrów wejściowych i na tej podstawie sformułowanie wytycznych do projektowania pasywnego podziemnego magazynu z otworowymi wymiennikami; przykładową wielokryterialną optymalizację efektywności magazynowania dla arbitralnie wybranych parametrów materiałowych górotworu i wymiennika.

We *Wstępie* (Rozdział 1) Autor uzasadnia praktyczne i teoretyczne powody podjęcia badań, ich cel i zakres zrealizowanych prac. Sezonowy i losowy charakter odnawialnych źródeł energii i konieczność dopasowania ich wydajności do zmiennego zapotrzebowania na energię wymusza konieczność jej efektywnego magazynowania. Mimo, że idea podziemnych magazynów energii termicznej, wykorzystująca naturalną pojemność cieplną ziemi i górotworów, znana jest od ponad sześćdziesięciu lat, dostępne w literaturze wyniki badań dotyczących efektywności termicznej tej taniej i praktycznej formy magazynowania energii są fragmentaryczne. Obejmują one analizy roli wybranych pojedynczych, a nie wszystkich istotnych dla efektywnej pracy magazynu, parametrów materiałowych, konstrukcyjnych i eksploatacyjnych. Dotyczy to w szczególności systemów pasywnych (bez pompy ciepła), gdzie magazynowanie odbywa się przy wyższych poziomach temperatury. Nie opracowano też narzędzi do szybkiej oceny efektywności i optymalizacji pracy podziemnych magazynów energii. Dlatego Habilitant podjął się ambitnego zadania wypełnienia tej luki przyjmując za cel i zakres swych badań: opracowanie analitycznego modelu do oceny efektywności podziemnego magazynowania energii termicznej, szeroką analizę parametryczną powiązaną z badaniem wrażliwości globalnej dla określenia roli kilkunastu parametrów materiałowych, konstrukcyjnych i eksploatacyjnych w efektywnej i optymalnej pracy podziemnego magazynu z otworowymi wymiennikami ciepła.

W rozdziałach 2 i 3 Habilitant wprowadza czytelnika w tematykę badań opisując metody i systemy sezonowego magazynowania energii termicznej, wykorzystujących pojemność cieplną, ciepło przemiany fazowej lub ciepło reakcji chemicznych. Szczególnie wiele miejsca Autor poświęca omówieniu systemów naziemnych i podziemnych magazynujących energię przez podwyższenie temperatury medium magazynującego z wykorzystaniem pojemności cieplnej ciał stałych i cieczy. Do pierwszej grupy systemów magazynowania energii w układzie otwartym należą naziemne zbiorniki z wodą. W drugiej grupie wykorzystuje się warstwy wodonośne, jaskinie, podziemne zbiorniki wodne, zbiorniki zagłębione w gruncie wypełnione wodą i żwirem oraz pracujące w układzie zamkniętym magazyny wykorzystujące naturalną pojemność cieplną gruntu. W tych ostatnich stosuje się specjalnie wydrążone kanały przewodowe w ziemi i otworowe wymienniki ciepła do przekazywania i pozyskiwania energii cieplnej z górotworu. Ta technologia sezonowego magazynowania energii, znana pod nazwą systemów BTES (Borehole Thermal Energy Storage), jest coraz powszechniej stosowana w instalacjach grzewczo-chłodniczych współpracujących z kolektorami słonecznymi oraz wykorzystujących ciepło odpadowe. Jest ona też przedmiotem wieloletnich badań Habilitanta, dlatego w rozdziale 3 zaznajamia On czytelnika z charakterystycznymi cechami systemu BTES, możliwymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi i nielicznymi istniejącymi na świecie instalacjami (głównie w Skandynawii, Niemczech i Kanadzie). W BTES, górotwór, będący magazynem ciepła, łączy się z odbiorcą za pośrednictwem otworowych wymienników ciepła wykonanych z polipropylenu, stali lub włókien szklanych, w formie pojedynczej lub podwójnej U-rurki albo dwóch koncentrycznych rur, umieszczanych w gruncie pionowo lub pod kątem. Dobór średnicy rur zależy od wymaganego przepływu wody, która jest nośnikiem ciepła. Istotnym elementem wymiennika otworowego jest materiał uszczelniający, którego zadaniem jest ochrona przed wodami gruntowymi i minimalizacja termicznego oporu układu wymienników ciepła.

W rozdziale 4 rozprawy Autor dokonuje analizy zjawisk fizycznych w procesie podziemnego magazynowania energii, krytycznej oceny dostępnych modeli analitycznych i numerycznych i na tym tle przedstawia własny quasi-trójwymiarowy model numeryczny podziemnego magazynu energii.

Złożona, sprzężona wymiana ciepła w systemie gruntowego magazynowania energii obejmuje konwekcyjny transport płynu w rurach wymienników otworowych, przewodzenie w materiale rury i uszczelnieniu, a także przewodzenie i konwekcyjny transport ciepła w porowatym medium górotworu, w którym obecne są wody gruntowe. Konieczne jest też uwzględnienie dodatkowych zjawisk wpływających na wymianę ciepła na powierzchni górotworu, takich jak dynamiczne zmiany temperatury, wilgotności związanej z opadami deszczu, promieniowania słonecznego i ruchu powietrza. Przedstawiony w pracy model matematyczny tych zjawisk jest klasyczny: obejmuje równanie konwekcyjno-dyfuzyjne transportu energii w porowatym górotworze z warstwami wodonośnymi; w wymienniku otworowym procesy transportu masy i ciepła opisane są równaniem ciągłości dla przepływu nieściśliwego, równaniami Naviera Stokesa z dobranym modelem turbulencji oraz konwekcyjno-dyfuzyjnym równaniem transportu energii w płynie. Pominięto przewodzenie w ściankach wymiennika i materiale uszczelniającym.

Dokonując przeglądu literaturowego dostępnych modeli analitycznych magazynu BTES Autor zauważa, że uwzględniają one transport ciepła w górotworze pomiędzy wymiennikami, zaniebują natomiast pojemność cieplną płynu, rur i materiału uszczelniającego. Otworowy wymiennik ciepła – pionowa U-rurka modelowany jest analitycznie jako liniowe lub cylindryczne źródło ciepła, górotwór jest medium pół-nieskończonym, pomijana jest wymiana ciepła na powierzchni górnej górotworu. Modele te zaniebują przepływ ciepła wzdłuż wymiennika, dlatego nie są odpowiednie do analiz długoczasowego zachowania magazynu. Należą one do grupy modeli globalnych, gdzie transport ciepła jest rozważany wokół wymiennika, a nie w samym wymienniku. W dostępnych modelach uwzględniających ustalony przepływ ciepła w wymienniku, uwzględnia się procesy konwekcji między płynem a ścianką, przewodzenie przez ściankę rur i materiał uszczelniający, modelując je stałymi oporami cieplnymi. Nie bierze się natomiast pod uwagę oddziaływań termicznych między rurami wymiennika, pomija zmiany temperatury płynu wzdłuż wymiennika oraz przepływ ciepła w jego kierunku osiowym. Zaawansowane modele numeryczne, oparte na pełnym opisie transportu ciepła w górotworze i wymienniku, uwzględniają przepływ ciepła wewnątrz i na zewnątrz otworu wymiennika, zmienny w czasie przepływ płynu w U-rurce oraz zmienne w czasie i przestrzeni warunki brzegowe. Autor omawia 24 pozycje literaturowe, w których wykorzystano metody elementów skończonych, objętości kontrolnych lub różnic skończonych do budowy takich dwu i trójwymiarowych modeli kompleksowych. Podstawową ich wadą są bardzo długie czasy obliczeń, które uniemożliwiają ich wykorzystanie w analizach parametrycznych i optymalizacyjnych. Wynikają one głównie z ekstremalnych dysproporcji pomiędzy średnicą i długością wymiennika, co wymaga stosowania bardzo gęstych wielowęzłowych siatek dyskretyzacji.

Dlatego Habilitant zaproponował własny quasi-trójwymiarowy model numeryczny podziemnego magazynu energii bazujący na uproszczeniu opisu wymiany ciepła w płynie i w U-rurce, pozwalający na znaczne skrócenie czasu obliczeń. Nieustalony transport ciepła w płynie opisany został dwoma jednowymiarowymi równaniami różniczkowymi konwekcyjno -dyfuzyjnego transportu energii wzdłuż osi wymiennika oddzielnie dla rury zasilającej i powrotnej, z uwzględnieniem jednowymiarowego modelu wymiany ciepła między płynem a uszczelnieniem. Modelowano ją na podstawie uzyskanej z obliczeń 3D lokalnej temperatury na powierzchni ścianka-U-rurki - uszczelnienie. Wymianę ciepła w materiale ścianki oraz na powierzchni omywanej poruszającym się płynem uwzględniono przez wyznaczenie oporów cieplnych przewodzenia i przejmowania.

Zaobserwowane w różnych publikacjach niejednoznaczne podejście do modelowania warunków brzegowych na dolnej i bocznej ściankach ograniczających obszar obliczeniowy górotworu, skłoniło Habilitanta do przeprowadzenia analizy numerycznej wpływu miejsca i rodzaju przyjętego warunku brzegowego na pole temperatury w wybranym podziemnym magazynie BTES, składającym się z 36 otworowych wymienników typu U-rurka połączonych w 12 linii. Wyniki 17 eksperymentów numerycznych, dla różnych promieni i głębokości obszaru obliczeniowego górotworu, doprowadziły do oczywistego wniosku, że w celu zminimalizowania wpływu warunków brzegowych wspomniane powierzchnie powinny być dostatecznie daleko odsunięte od obszaru wymienników otworowych.

W kompleksowej analizie cieplno-przepływowej gruntowego magazynu ciepła modelowanie i symulacja komputerowa odgrywają kluczową rolę, wobec niemożności przeprowadzenia wielowariantowych analiz na obiekcie rzeczywistym, ze względu na czas i koszty takich eksperymentów. W instalacjach BTES dąży się do minimalizacji strat cieplnych przez

umieszczenie wymienników otworowych blisko siebie. By w modelu symulacyjnym uwzględnić ich wzajemne interakcje cieplne oraz możliwie dokładnie określić ilość energii doprowadzonej i odzyskanej z magazynu, należy przeprowadzić obliczenia w szerokim okresie czasowym. Wymaga to efektywnych modeli obliczeniowych. Taki model zaproponował Habilitant w swojej rozprawie doktorskiej, a w ramach dalszych prac zaadoptował do komercyjnego systemu ANSYS CFX. Podstawy tego autorskiego modelu analizy magazynu gruntowego w pełnej skali czasowej oraz wyniki jego weryfikacji i walidacji zostały przedstawione w rozdziale 5 opiniowanej monografii.

Jest to jednowymiarowy model otworowego wymiennika ciepła, w którym opisano transport energii w rurach i materiale uszczelniającym. Model uwzględnia zmiany temperatury wzdłuż pionowej osi wymiennika, pomija w kierunku promieniowym. Obszar materiału uszczelniającego podzielono na trzy podobszary: w okolicach rury zasilającej i rury powrotnej oraz obszar między rurami, by uwzględnić obserwowaną dużą różnicę temperatur płynu w rurach wymiennika, zwłaszcza na początku procesu. W budowie modelu wybrano niewielki segment wymiennika o długości dz, w którym zapisano jednowymiarowe nieustalone równania transportu ciepła w rurze zasilającej, powrotnej i materiale uszczelniającym, z uwzględnieniem wymiany ciepła między poszczególnymi podobszarami i rurami. Współczynniki wymiany ciepła między stykającymi się elementami wymiennika wyznaczono z oporów cieplnych poszczególnych elementów. Model ograniczony jest do symulacji transportu ciepła tylko w wymienniku otworowym, został więc zintegrowany z 3D modelem MES opisującym transport ciepła i masy w górotworze. Habilitant porównał wyniki własnych obliczeń, dla temperatury płynu na wylocie oraz zmiany temperatury na wybranym poziomym przekroju magazynu, z pomiarami z testów reakcji termicznej i obliczeniami uzyskanymi innymi dostępnymi w literaturze modelami dla wybranej geometrii magazynu. Chwilowe i średnie różnice w czasie nie przekraczały kilku procent. Proponowany przez Autora model uwzględnia wpływ różnicy temperatury płynu między rurami, poprawia dokładność, pozwala na istotne skrócenie czasu obliczeń.

Efektywność termiczna procesu magazynowania energii w gruntowym wymienniku ciepła typu BTES, zdefiniowana jako ilość energii odzyskanej do doprowadzonej w określonym czasie pracy magazynu, zależy od wielu parametrów materiałowych, konstrukcyjnych i eksploatacyjnych. Do pierwszej grupy zaliczają się takie jak: przewodność cieplna, ciepło właściwe i gęstość skał, materiału uszczelniającego, rur wymiennika i płynu; do grupy konstrukcyjnych: głębokość, średnica otworu i grubość ścianek rur, ich rozmieszczenie i pochylenie osi wymiennika; parametry eksploatacyjne to temperatura i prędkość przepływu płynu w wymienniku, temperatura nośnika ciepła, charakter pracy (okresowy, ciągły) oraz lokalne warunki klimatyczne.

Wnioski z przeprowadzonego przez Habilitanta krytycznego przeglądu literatury, dotyczącego analiz parametrycznych efektywności podziemnego magazynowania energii, zostały przedstawione w rozdziale 6 rozprawy. Większość dostępnych wyników badań dotyczy magazynów z pompą ciepła, nieliczne instalacji BTES. Ze względu na mnogość parametrów, dostępne analizy i oceny ograniczone są do selektywnie wybranych parametrów, nie są więc kompletne, nie uwzględniają też powiązań między parametrami. Wynika z nich między innymi, że: zwiększenie przewodności cieplnej materiału uszczelniającego znacznie zmniejsza opór cieplny wymiennika; średnica jego rur ma duży wpływ na efektywność termiczną magazynowania, zaś głębokość wymiennika niewielki; zwiększenie liczby wymienników i ich długości zwiększa pojemność cieplną magazynu i efektywność magazynowania; można ją też podnieść przez zwiększenie temperatury płynu podczas dostarczania ciepła i zmniejszenie podczas odzysku energii: istotny jest wpływ warunków zewnętrznych na pracę magazynu, zwłaszcza w północnym klimacie.

Uzupełnieniem powyżej przedstawionych analiz były własne badania Habilitanta dotyczące nierozpatrywanych dotychczas zagadnień, takich jak: wpływ rozstawu rur i przewodności materiału uszczelniającego na projektowaną głębokość wymiennika; wpływ rozmieszczenia wymienników z pochyleniem względem powierzchni gruntu na efektywność magazynowania; wpływ konstrukcji rur na intensywność wymiany ciepła; wpływ prędkości płynu w rurach wymiennika na jego średni opór cieplny. Na podstawie przeprowadzonych symulacji komputerowych z wykorzystaniem własnych modeli oraz pakietu ANSYS CFX dr inż. J. Wołoszyn pokazał, że: zwiększenie rozstawu U-rurek wymiennika pozwala zmniejszyć projektowaną długość wymiennika zwłaszcza przy małej przewodności cieplnej materiału uszczelniającego; zwiększenie kąta pochylenia wymiennika

otworowego niekorzystnie wpływa na efektywność termiczną magazynu, a zwarte rozmieszczenie wymienników znacznie ją poprawia; zastosowanie rur wymiennika ze spiralnymi żebrami wewnętrznymi powoduje nieznaczny wzrost współczynnik przejmowania ciepła na wewnętrznej ścianie rury.

Rozdział 7 jest najważniejszą częścią monografii. Habilitant przedstawił w niej autorski oryginalny model analityczny oceny efektywności magazynowania energii w systemach wykorzystujących otworowe wymienniki ciepła. Oparty jest on na technice planowania eksperymentów komputerowych, symulacjach numerycznych podziemnego magazynu metodą elementów skończonych (zastępujących niemożliwe do przeprowadzenia doświadczenia na obiekcie rzeczywistym) oraz metodzie powierzchni odpowiedzi. Pozwala na wyznaczenie efektywności termicznej magazynu BTES z uwzględnieniem wszystkich istotnych parametrów materiałowych, konstrukcyjnych i eksploatacyjnych wraz z interakcjami między nimi.

Na podstawie literatury i własnych doświadczeń Autor wybrał 17 różnych parametrów materiałowych, konstrukcyjnych i eksploatacyjnych oraz zakresy ich zmienności. W celu zmniejszenia olbrzymiej liczby wymaganych eksperymentów numerycznych przy tak dużej liczbie parametrów wejściowych, Habilitant wykorzystał teorię planowania eksperymentu - zastosował tak zwany plan centralny kompozycyjny rozszerzony, gdzie każda ze zmiennych wejściowych analizowana jest na 5-ciu poziomach, a dla dalszego zmniejszenia liczby obliczeń zastosował plan ułamkowy, co pozwoliło zredukować tę liczbę do 581. W obliczeniach tych wykorzystał własny jednowymiarowy model wymiennika połączony z modelem MES dla górotworu. Na podstawie uzyskanych wyników zbudował wielowymiarowe powierzchnie odpowiedzi wykorzystując dostępny w pakiecie ANSYS algorytm agregacji genetycznej. Następnie, przeprowadził trójstopniową weryfikację przez ocenę zgodności wyznaczonych powierzchni odpowiedzi z fizyką zjawiska, sprawdzenie wartości statystycznych miar RSME i współczynnika determinacji dla różnic pomiędzy odpowiedzią obiektu badań (numeryczną) a odpowiedzią z modelu (z powierzchni odpowiedzi) dla N punktów planu eksperymentu; losowanie punktów w wielowymiarowej przestrzeni odpowiedzi i ponowne sprawdzenie wartości współczynnika determinacji. Gdy weryfikacja jest niezadawalająca generuje się dodatkowe punkty zagęszczające, w celu lepszego dopasowania modelu do punktów planu eksperymentu, wykorzystując planowanie losowe, a następnie przeprowadza się dodatkowe obliczenia numeryczne. Tak uzyskane wielowymiarowe powierzchnie odpowiedzi tworzą analityczny opis zachowania obiektu (modelu numerycznego).

Habilitant wykorzystał ten opis do wyznaczenia efektywności termicznej procesu magazynowania energii dla różnych kombinacji parametrów wejściowych wybranego magazynu BTES składającego się z 96 pionowych otworowych wymienników ciepła typu pojedynczej U-rurki. Przeanalizował 10 lat eksploatacji magazynu; w każdym roku był cykl magazynowania przez 182 dni i cykl odbioru energii trwający kolejne 182 dni. Przeprowadził 581 doświadczeń numerycznych, zgodnie z ułamkowym planem centralnym kompozycyjnym, dodatkowo wyznaczył 300 równomiernie rozmieszczonych punktów zagęszczających by powiększyć podzbiór doświadczeń ograniczony przez plan ułamkowy. Uzyskane wyniki obliczeń zostały przedstawione w pracy w postaci rozkładów temperatury w górotworze po roku i 9 latach eksploatacji, zmian temperatury płynu na dopływie i wypływie z magazynu dla wybranej linii zasilającej oraz zmian temperatury w osi magazynu BTES na wybranych głębokościach dla czterech wybranych punktów planu eksperymentów. Analiza uzyskanej efektywności termicznej procesu magazynowania energii w górotworze w całym 10 letnim okresie pokazuje, że w zależności od założonej konfiguracji parametrów zmienia się ona od 0 do 0,79, przy czym w pierwszym roku eksploatacji jest w większości analizowanych przypadków niska (nie przekracza 20%) i rośnie w kolejnych latach. W habilitacji pokazano też uzyskane algorytmem agregacji genetycznej 34 wybrane zweryfikowane powierzchnie odpowiedzi, dla takich parametrów wyjściowych jak wartość energii dostarczonej, wartość energii odzyskanej i efektywność magazynu.

W rozdziale 8 monografii Kandydat pokazał przydatność opracowanego wielowymiarowego modelu analitycznego do analizy globalnej wrażliwości efektywności procesu magazynowania energii w magazynie BTES na zmiany parametrów materiałowych, konstrukcyjnych i eksploatacyjnych. Współczynnik wrażliwości wyznaczył numerycznie wykorzystując trzy różne metody analizy, tj. oparte na wariancji, funkcji rozkładu skumulowanego i współczynnika korelacji rang Spearmana. Analiza wielkości i znaku współczynnika wrażliwości pokazuje, że na

efektywność procesu magazynowania największy wpływ mają: temperatura płynu na dopływie podczas dostarczania energii - jej zwiększenie daje wzrost efektywności; temperatura płynu na dopływie podczas odzysku energii, współczynnik przewodzenia ciepła górotworu oraz rozmieszczenie wymienników – wzrost każdego z tych parametrów spowoduje spadek efektywności. Pozostałe parametry, w tym w szczególności rozstaw rur i ich średnica mają niewielki wpływ na efektywność magazynowania energii oraz ilość energii doprowadzonej i odzyskanej.

Rozdział 9 rozprawy dr inż. został poświęcony sformułowaniu wytycznych konstrukcyjnych i eksploatacyjnych, potrzebnych do uzyskania wysokiej efektywności termicznej magazynowania energii w instalacji BTES. Dr inż. J. Wołoszyn wykorzystał w tym celu wyniki przeprowadzonej analizy globalnej wrażliwości efektywności oraz model analityczny do jej oceny w losowo wybranych konfiguracjach, spełniających narzucone kryteria minimalnych wartości efektywności i wielkości odzyskanej energii w różnych zakresach parametrów wejściowych. Do najważniejszych zaleceń wynikających z tych analiz należą: zapewnienie odpowiednio wysokiej temperatury płynu na dopływie podczas dostarczania energii i odpowiednio niskiej podczas jej odzysku; właściwe rozmieszczenie wymienników względem siebie w zależności od przewodności górotworu – powinno ono być promieniowe, a odległości pomiędzy osiami wymienników nie powinny być zbyt duże (2-4m); stosowanie materiałów uszczelniających o przewodności większej od 2W/mK; zapewnienie izolacji cieplnej na górnej powierzchni magazynu o promieniu równym co najmniej odległości najdalszego wymiennika od osi BTES.

W celu ilustracji możliwości praktycznych opracowanego narzędzia analitycznego do oceny efektywności magazynowania energii z wykorzystaniem magazynów typu BTES, Kandydat przeprowadził przykładową wielokryterialną optymalizację efektywności magazynowania dla arbitralnie wybranych parametrów materiałowych górotworu i wymiennika. Metodę badań i ich wyniki przedstawił w rozdziale 10 monografii. Biorąc pod uwagę wielowymiarowość rozpatrywanego obiektu jako funkcje celu wybrał poszukiwanie największych wartości efektywności termicznej i ilości odebranej z magazynu energii, dla przyjętych właściwości górotworu i danych dotyczących warunków na powierzchni. Do rozwiązania tego zagadnienia Habilitant zaproponował wykorzystanie metody optymalizacji w sensie Pareto, gdzie poszukuje się ekstremum funkcji celu w przestrzeni wielowymiarowej w postaci zbioru rozwiązań niezdominowanych, kompromisowych dających w przestrzeni celów tak zwany front Pareto. Tworzy się pojedynczą ważoną funkcję celu, która w rozpatrywanym przypadku magazynu posiada dwa równo ważne składniki: jeden związany z maksymalizacją efektywności magazynowania, drugi z maksymalizacją energii odzyskanej. Na podstawie uzyskanego zbioru rozwiązań Pareto-optymalnych tzn. takich, dla których przy każdym nowym zestawie parametrów wejściowych nie poprawi się jednego kryterium jakości bez pogorszenia drugiego, oraz analizy frontu Pareto Habilitant wyznaczył konkretne optymalne wartości parametrów konstrukcyjnych dla analizowanego przypadku.

Rozdział 11 to wnioski końcowe i podsumowanie zawierające podkreślenie najważniejszych z punktu widzenia Habilitanta osiągnięć badawczych, wkładu w lepsze poznanie fizyki i rozwój techniki magazynowania energii termicznej w górotworze z wykorzystaniem wymienników otworowych oraz w rozwój systemów BTES. Jako dalsze kierunki prac Kandydat przewiduje rozszerzenie modelu analitycznego do oceny efektywności innych konfiguracji wymienników, ich połączenia, analizy dla zróżnicowanych głębokości wymienników oraz opracowanie algorytmów sterowania pracą BTES tak by optymalnie wykorzystać możliwości magazynu.

W mojej ocenie, opiniowana rozprawa habilitacyjna zawiera wyniki oryginalnych badań Kandydata, dotyczących bardzo aktualnych problemów wykorzystania gruntów naturalnych do magazynowania energii cieplnej. Realizując ambitne zadanie poszerzenia niedostatecznej wiedzy dotyczącej zależności efektywności termicznej pasywnych gruntowych magazynów energii od parametrów materiałowych, geometrycznych i eksploatacyjnych górotworu i otworowych wymienników ciepła, Kandydat zbudował modele symulacyjne wymiany ciepła i masy w gruncie i wymiennikach oraz analityczny model oceny efektywności podziemnego magazynu energii termicznej, opracował metodykę wielokryterialnej optymalizacji i analizy globalnej wrażliwości efektywności termicznej magazynowania energii na zmiany parametrów wejściowych. Wykorzystał w nich

szeroki i zaawansowany aparat matematyczny obejmujący: symulacje zagadnień teorii pola metodą elementów skończonych, technikę planowania eksperymentu numerycznego i metodę powierzchni odpowiedzi, statystyczne miary odchyień, różne metody analizy wrażliwości globalnej oraz metodę optymalizacji w sensie Pareto. Sformułowane przez Habilitanta (na podstawie analizy globalnej wrażliwości efektywności termicznej) kryteria doboru parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych pasywnego magazynu gruntowego oraz zaproponowana metodyka ich optymalizacji mają istotne znaczenie praktyczne dla projektantów gruntowych magazynów energii termicznej wykorzystujących wymienniki otworowe.

Stwierdzam zatem, że przedstawiona do recenzji autorska monografia, jako główne osiągnięcie naukowe, spełnia warunki stawiane w postępowaniu habilitacyjnym (Art.16 ust.2 Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dn. 14.03.2003 r.).

3. Ocena całokształtu dorobku naukowo-badawczego i publikacyjnego

Zainteresowania i dorobek naukowo-badawczy dr inż. Jerzego Wołoszyna, od początku Jego kariery akademickiej, dotyczy spójnej tematyki związanej z obszarem energetyki odnawialnej, a w szczególności z rozwijającymi się technologiami magazynowania nadwyżek energii, ciepła odpadowego i energii z kolektorów słonecznych w naturalnych zbiornikach gruntowych.

Działalność badawcza Kandydata przed uzyskaniem stopnia doktora nauk technicznych koncentrowała się na modelowaniu procesów transportu ciepła i masy w otworowych wymiennikach ciepła, pośredniczących w wymianie energii między magazynem gruntowym a odbiorcą. Zaowocowała ona opracowaniem oryginalnego autorskiego modelu obliczeniowego wymiany ciepła w wymienniku oraz jego walidacją w warunkach laboratoryjnych i eksploatacyjnych. Opracowane narzędzie obliczeń numerycznych i wyniki przeprowadzonych symulacji komputerowych były treścią 14 publikacji i wystąpień konferencyjnych oraz wyróżnionej rozprawy doktorskiej.

Po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych Habilitant znacznie poszerzył zakres tematyczny badań, tworząc modele symulacyjne procesów transportu masy i ciepła w pasywnych gruntowych magazynach energii termicznej z układami otworowych wymienników ciepła. Wykorzystując te zaawansowane modele symulacji komputerowej, technikę planowania eksperymentu i metodę powierzchni odpowiedzi, zbudował oryginalny model analityczny do szybkiej oceny efektywności procesu magazynowania energii w funkcji parametrów materiałowych, konstrukcyjnych i eksploatacyjnych magazynu i górotworu; przeprowadził badania globalnej wrażliwości tej efektywności identyfikując najistotniejsze parametry magazynu BTES decydujące o jej wielkości oraz wielokryterialną analizę optymalizacyjną efektywności magazynowania dla założonych parametrów materiałowych górotworu i wymiennika. Wyniki tych badań zostały upowszechnione w 20 artykułach i referatach konferencyjnych oraz były treścią ocenionej powyżej monografii habilitacyjnej.

Całkowity dorobek wydawniczy dr. inż. Jerzego Wołoszyna obejmuje 35 publikacji, tj.:

- 5 artykułów w czasopismach znajdujących się w bazie JCR, w tym jeden autorski i dwa współautorskie (z 80% udziałem Kandydata) opublikowane po doktoracie oraz dwa współautorskie (z 80% i 15% udziałem Habilitanta), które ukazały się przed uzyskaniem stopnia naukowego. Zwraca uwagę wysoki IF periodyków, w których ukazały się cztery z tych publikacji (np.: w *Energy Conversion & Management* z IF=6,377 czy w *Geothermics* z IF=2,86);
- autorską monografię w języku polskim – rozprawę habilitacyjną;
- dwie współautorskie monografie wydane przez AGH po doktoracie (udział 10-11%) oraz autorski rozdział w monografii wydanej przez AGH przed doktoratem;
- cztery artykuły autorskie i jeden współautorski (80% udziału Habilitanta) po doktoracie oraz 3 współautorskie (35-60%) przed doktoratem w czasopismach spoza listy JCR;
- 5 referatów na konferencjach międzynarodowych (w tym 3 autorskie) oraz 5 autorskich wystąpień na konferencjach krajowych po doktoracie;

- 4 referaty na konferencjach międzynarodowych (w tym jeden autorski) oraz dalszych 5 (w tym jeden autorski) na krajowych spotkaniach naukowych przed doktoratem.

Dorobek ten uzupełnia współautorstwo krajowego patentu (z 30% udziałem Kandydata) dotyczącego stabilizacji współczynnika wydajności pompy ciepła z gruntowym wymiennikiem poziomym.

Zgodnie z danymi z bazy *Web of Science*, widoczne w niej prace Pana Doktora były cytowane 56 razy, sumaryczny *impact factor* wynosi 16,49, zaś indeks *Hirscha* $IH=4$. Dane bibliometryczne według bazy Scopus to: 70 cytowań i $IH=4$, zaś według Google Scholar : 112 cytowań i $IH=5$. Zwraca uwagę znaczny przyrost tych wskaźników w 2018 roku.

Za swoje osiągnięcia naukowe Kandydat był dwukrotnie wyróżniony indywidualną i zespołową nagrodą naukową Rektora Politechniki Śląskiej (w 2015 i 2017 roku).

Dorobek wydawniczy Kandydata został znacznie powiększony po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych (21 publikacji, w tym 3 artykuły w prestiżowych czasopismach z bazy JCR, współautorstwo 2 monografii, patent krajowy, znaczne powiększenie sumarycznego IF). Silną stroną wniosku jest autorska monografia habilitacyjna.

Analiza całokształtu dorobku naukowego dr inż. Jerzego Wołoszyna wskazuje na Jego dużą aktywność badawczą w zakresie badań podstawowych i aplikacyjnych energetyki odnawialnej, w tym w szczególności gruntowych wymienników ciepła i magazynów energii cieplnej. Oryginalna metodyka badań, oparta na zaawansowanym aparacie matematycznym i szerokiej wiedzy z zakresu modelowania i symulacji komputerowej procesów ciepłno-przepływowych, autorskie modele obliczeniowe oraz uzyskane wyniki obszernych symulacji gruntowego magazynu energii termicznej i analiz globalnej wrażliwości efektywności magazynowania energii w gruncie, dają narzędzia do lepszego poznania fizyki procesów i ich praktycznego wykorzystania w doborze parametrów materiałowych konstrukcyjnych i eksploatacyjnych instalacji BTES.

Dorobek naukowo-badawczy Kandydata wnosi więc istotny wkład w rozwój dyscypliny naukowej Energetyka (obecnie Inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka). Spełnia też wymogi zapisane w §4 Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 1 września 201 (Dz.U. Nr 196, poz. 1165)

4. Ocena dorobku dydaktycznego, organizacyjnego i popularyzatorskiego oraz współpracy międzynarodowej

Pozytywnie oceniam dorobek Habilitanta w zakresie kształcenia studentów. W swojej dziewięcioletniej karierze nauczyciela akademickiego prowadził wszystkie formy zajęć, tj. wykłady, ćwiczenia, laboratoria i prace dyplomowe, na studiach stacjonarnych pierwszego i drugiego stopnia oraz kursach podyplomowych. Szeroki zakres nauczanych przez Kandydata treści obejmował: (1) - zastosowania komputerów w obliczeniach inżynierskich w ramach przedmiotów: *Pakiety Informatyczne w mechanice i budowie maszyn, Metody optymalizacji eksperymentów numerycznych, Metody obliczeniowe i planowanie eksperymentów, Zintegrowane Systemy Zarządzania informacją czy Numeryczne modelowanie układów ciągłych*; (2) – zagadnienia termodynamiki i odnawialnych źródeł energii, w ramach przedmiotów: *Odnawialne źródła energii – magazynowanie energii termicznej, Termodynamika i Termodynamika techniczna*. Był promotorem 49 inżynierskich i magisterskich prac dyplomowych.

Znaczące są osiągnięcia Kandydata, jak na młodego naukowca, w zakresie opiniowania publikacji zgłaszanych do międzynarodowych czasopism naukowych, wydawanych przez światowych liderów takich jak: Elsevier, Emerald czy Springer. Habilitant wykonał 12 recenzji dla czasopism z listy JCR, w tym dla prestiżowych periodyków o dużym IF, takich jak *Applied Energy, Energy Conversion and Management, International Journal of Heat and Mass Transfer, Geothermics* czy *Hydrology Journal*.

W ocenie aktywności Habilitanta w ramach promocji nauki należy zwrócić uwagę na Jego udział w XIV Festiwalu Nauki w Krakowie i prezentację macierzystej Katedry Systemów Energetycznych i Urządzeń Ochrony Środowiska na Targach Technik Kotłowych, Procesów Ciepłych i Wody Przemysłowej WATER & HEAT.

Osiągnięcia organizacyjne dr inż. Jerzego Wołoszyna są przeciętne, typowe dla młodego nauczyciela akademickiego, związane z pełnionymi funkcjami w macierzystym Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH i Energetyki Politechniki Śląskiej. Habilitant od 2012 roku jest członkiem Wydziałowej Doktoranckiej Komisji Stypendialnej oraz komisji egzaminów dyplomowych. Uczestniczył też w pracach organizacyjnych dwóch konferencji naukowych Energetyka i Ochrona Środowiska – ENOS.

Skromny jest dorobek Habilitanta w zakresie współpracy międzynarodowej i eksperckiej. Pan Doktor uczestniczył w jednym projekcie europejskim - w ramach Programu Operacyjnego Wiedza Edukacja Rozwój 2014-2020 organizując studyjne wyjazdy studentów; nie odbył żadnego stażu naukowego w ośrodku zagranicznym; był współautorem jednej ekspertyzy wykonanej dla krajowego podmiotu gospodarczego.

Z analizy przedłożonej dokumentacji wniosku habilitacyjnego wynika, że Kandydat nie brał udziału w komitetach naukowych konferencji, nie jest też członkiem komitetów redakcyjnych i rad naukowych czasopism, nie brał udziału w pracach międzynarodowych organizacji i towarzystw naukowych. Natomiast od 2018 roku jest członkiem Krakowskiego Oddziału Polskiego Towarzystwa Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej.

Podsumowując dorobek dr inż. Jerzego Wołoszyna w zakresie osiągnięć dydaktycznych i popularyzatorskich oraz współpracy międzynarodowej stwierdzam, że spełnia on w dostatecznym stopniu większość kryteriów zapisanych w §5 Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 1 września 201 (Dz.U. Nr 196, poz. 1165).

5. Wniosek końcowy

Uwzględniając przeprowadzoną powyżej szczegółową ocenę rozprawy habilitacyjnej oraz całokształtu osiągnięć naukowo-badawczych, dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzatorskich dr inż. Jerzego Wołoszyna stwierdzam, że Jego dorobek we wszystkich tych aspektach spełnia wymagania, zapisane w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z 14 marca 2013 roku oraz w §4 i §5 Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego w sprawie kryteriów oceny osiągnięć osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora habilitowanego z dnia 1 września 2011 (Dz.U. Nr 196, poz. 1165).

W realizacji ambitnych zadań badawczych Habilitant wykazał się kompetencjami i dojrzałością naukową, uzasadniającą uzyskanie statusu samodzielnego badacza. Jego osiągnięcia naukowo-badawcze są ponadprzeciętne, wnoszą istotny wkład w rozwój dyscypliny naukowej Energetyka (obecnie Inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka).

Niestety, mimo wyrażonej powyżej bardzo pozytywnej opinii o osiągnięciach i dorobku dr inż. Jerzego Wołoszyna, które w pełni spełniają wymogi ustawowe i zwyczajowe do awansu naukowego, nie mogę poprzeć wniosku o nadanie stopnia doktora habilitowanego nauk technicznych w dyscyplinie Mechanika, bowiem w moim przekonaniu Jego dorobek badawczy, publikacyjny i recenzencki w całości wpisuje się w dyscyplinę naukową Energetyka.

