

prof. dr hab. inż. Krzysztof Badyda
Instytut Techniki Ciepłej
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
Politechnika Warszawska

Recenzja rozprawy doktorskiej autorstwa mgr inż. Damiana Pędziwiatry,
zatytułowanej: „*Badanie innowacyjnego układu odzyskiwania oleju z parowników
gruntowych pomp ciepła typu bezpośrednio parowanie/woda*”

1. Podstawa wykonania recenzji

Recenzja została opracowana na zlecenie Kierownika Dyscypliny Naukowej
Inżynieria Mechaniczna, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki Politechniki
Częstochowskiej w wyniku uchwały Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria
Mechaniczna Politechniki Częstochowskiej nr 28/2022/2023 z dnia 25 maja 2023
roku.

2. Zasadność podjęcia tematu

W ostatnich latach, w wyniku obserwowanych zmian klimatycznych, także działań politycznych mamy do czynienia z próbą transformacji gospodarki, a w szczególności energetycznej, w kierunku ograniczenia, a następnie rezygnacji z wykorzystania paliw kopalnych. Jednym z istotnych nurtów jest tu intensywny rozwój odnawialnych źródeł energii, w najszerszym zakresie tych korzystających z energii słonecznej i wiatrowej. Od pewnego czasu intensywnie rozwija się sektor energetyki prosumenckiej, w szczególnej mierze opartej na źródłach korzystających z energii słonecznej. Jednym ze sposobów zagospodarowania lokalnych nadwyżek energii elektrycznej jest zagospodarowanie ich na cele grzewcze. Dzięki temu powstają przesłanki do przejścia na gospodarkę neutralną klimatycznie w horyzoncie roku 2050.

Szczególnie efektywnym, a obecnie bardzo popularnym sposobem wykorzystania energii elektrycznej do celów grzewczych jest korzystanie z pomp ciepła. Współczynnik wydajności pompy ciepła, wskazujący ilość przekazanego do celów użytkowych ciepła w stosunku do włożonej pracy zwykle znacząco przekracza tu wartość 3. Ta cecha decyduje o potencjalnej atrakcyjności energetycznej, a w konsekwencji również ekonomicznej tej technologii.

W ostatnim okresie obserwowane jest olbrzymie zainteresowanie zastosowaniem pomp ciepła zarówno w małej jak i w wielkiej skali. W trakcie realizacji, bądź przygotowań są inwestycje w wielkoskalowe pompy ciepła zasilające

scentralizowane systemy ciepłownicze. Obok tego mamy instalacje odpowiadające potrzebom indywidualnym właścicieli domów jednorodzinnych czy niewielkich osiedli.

Przedmiotem zainteresowania Doktoranta stały się gruntowe pompy ciepła typu bezpośrednio parowanie/woda, nie korzystające z pośredniego obiegu glikolowego i z tego względu cechujące się prostszą budową i wyższą efektywnością energetyczną. W rozwiązaniu tym występują jednak ograniczenia związane z brakiem możliwości swobodnego wymiarowania wymienników gruntowych. Rozwiązanie ma charakter niszowy, ale niosący ze sobą potencjał badawczy, z uwagi na niewielką liczbę dostępnych z tego zakresu opublikowanych prac. Mgr inż. Damian Pędziwiatr, podejmując w rozprawie doktorskiej wskazaną problematykę skorzystał z osobistego doświadczenia zawodowego oraz tradycji badawczych macierzystej jednostki – Politechniki Częstochowskiej. Podjęte zadanie uważam za ważne oraz interesujące, atrakcyjne z punktu widzenia pracy o charakterze badawczym. W dodatku ma ono wyraźny aspekt aplikacyjny.

2. Charakterystyka i ocena ogólna rozprawy

Oceniana rozprawa powstała jako zwarty dokument, spisany na 94 stronach tekstu, podzielony na 7 ponumerowanych rozdziałów, dodatkowo z wykazem ważniejszych oznaczeń, tabel i rysunków oraz spisem cytowanej literatury. Na liście cytowań znalazły się dwie pozycje, w których Doktorant jest autorem uzyskanych patentów, trzecią stanowi złożone zgłoszenie patentowe. Należy podkreślić, że te trzy patenty związane są ściśle z tematyką rozprawy. Pozostałą część listy cytowanych dokumentów stanowi dalszych 11 pozycji. Bardzo niewiele jak na rozprawę doktorską. Warto może podkreślić, że na liście cytowań nie znalazła się publikacja Doktoranta z czasopisma Rynek Energii, która ukazała się już po zredagowaniu tekstu rozprawy.

Część wstępną pracy stanowią dwa pierwsze rozdziały. Rozdział pierwszy zawiera informacje wprowadzające w rozważaną problematykę: objaśnienie zasady działania pompy ciepła, klasyfikację pomp, ze szczególnym zwróceniem uwagi na interesujący Doktoranta obiekt w postaci pomp ciepła typu bezpośrednio odparowanie/woda. W rozdziale drugim przedstawiony został cel pracy oraz teza. Rozdział ten zawiera też przeprowadzony przez Doktoranta przegląd źródeł literaturowych.

W rozdziale trzecim opisane zostało stanowisko badawcze, działające w pełnej skali odpowiadającej potrzebom budynku jednorodzinnej (9 kW). Stanowisko zaprojektowane zostało w sposób umożliwiający realizację celów pracy, zdefiniowanych jako:

1. *Badanie wpływu wymiarowania wymiennika gruntowego na efektywność energetyczną;*

2. *Opracowanie układu umożliwiającego względnie dowolne wymiarowanie parowników gruntowych, wraz z jego badaniem pod kątem poprawności działania, na przygotowanym w warunkach rzeczywistych stanowisku badawczym.*

Przyjęta została konfiguracja układu umożliwiająca prowadzenie badań porównawczych dla wymiennika określonego jako standardowy. Obok tego powstały dwa zespoły wymienników podzielonych na dwie sekcje, jeden z nich jednopłaszczyznowy (obie sekcje rozlokowane na jednej głębokości), drugi rozlokowany na dwóch różnych głębokościach. Wszystkie wymienniki odbierające ciepło z gruntu zabudowano w konfiguracji poziomej. Tak rozbudowany zestaw umożliwił współpracę z zaprojektowanym do współpracy górnym źródłem ciepła w kilku wariantach dobranych pętli układu chłodzenia gruntu.

Zasadniczą część pracy stanowią rozdziały czwarty, i piąty. W rozdziale czwartym Doktorant opisał program zrealizowanych badań w uwzględnieniu wpływu elastyczności wymiarowania wymiennika gruntowego na pracę instalacji. Badaniami objęto między innymi wymiennik jednopłaszczyznowy o różnym stopniu przewymiarowania w stosunku do wymiennika standardowego (konwencjonalnego), stanowiącego punkt odniesienia do układów przewymiarowanych kolejno o 60%, 140% oraz 320%. Doktorant uwzględnił w pomiarach warunki określone jako niskotemperaturowe i średnotemperaturowe, przy temperaturze wody zasilającej równej odpowiednio 35°C oraz 55°C. Wyniki dla dodatkowej serii pomiarowej dotyczącej pośredniej temperatury wody zasilającej na poziomie 40°C i 50°C zamieszczone zostały w załączniku do rozprawy. Program zrealizowanych badań objął również analizę prędkości wychładzania gruntu, badania porównawcze dla wymienników w układzie jednopłaszczyznowym oraz dwupłaszczyznowym. Zakres pomiarów, obejmujący szeroki wachlarz konfiguracji układu, czasochłonne sesje, został, moim zdaniem, dobrany stosownie, a nawet z zapasem w stosunku do potrzeb badawczych wynikających z przyjętych celów.

W rozdziale piątym przedstawione zostały badania chronione jednym z patentów Doktoranta układu do odzyskiwania oleju z parowników bezpośrednio parowanie/woda (opisanego w rozdziale 2.2 rozprawy). Programem objęte zostały badania weryfikujące prawidłową pracę takiego układu z częściowo odciętym wymiennikiem, wyznaczenie optymalnej metody sterowania elektrycznymi zaworami odcinającymi oraz wpływ okresowych odcięć wymiennika na zmiany współczynnika COP.

Rozdział szósty i siódmy stanowią część zamykającą rozprawy. W rozdziale szóstym przeprowadzona została analiza układu umożliwiającego elastyczne wymiarowanie wymienników. W rozdziale siódmym Doktorant przedstawił wnioski oraz potwierdzenie przyjętej tezy, wskazał również kierunki dalszych interesujących zagadnień badawczych. Jednym z wątków jest analiza ekonomiczna, której w rozprawie nie przeprowadzono.

Uzupełnienie tekstu pracy stanowi wspólnie z nią oprawiony załącznik zawierający dane źródłowe: zestawienie uzyskanych w poszczególnych seriach badań wydajności grzewczych w funkcji parametrów badanego układu oraz przykładowe dane historyczne dotyczące pomiarów temperatury gruntu, a także podstawowych parametrów związanych z pracą pętli chłodzenia gruntu.

Całość rozprawy jest zwarta, została skomponowana logicznie, kolejne rozdziały wprowadzają czytelnika w sposób logicznie uzasadniony w kolejne zagadnienia dotyczące badanego zagadnienia. Należy zwrócić uwagę na fakt, że badania prowadzono w skali odpowiadającej zakładanej wielkości obiektów docelowych (budynków jednorodzinnych). Podkreślić należy szeroki zakres przeprowadzonych prac związanych z całością procesu badawczego: od zaprojektowania i zbudowania pełnoskalowego stanowiska do badań, przeprowadzenie samych badań, a następnie obróbkę i analizę wyników. Podkreślić również należy duży wkład wdrożonych, oryginalnych, chronionych autorskimi patentami rozwiązań własnych Doktoranta.

Moim zdaniem istotnymi walorami rozprawy są:

- charakter aplikacyjny wynikający z zastosowanej pełnoskalowej instalacji badawczej zespołu wymienników gruntowych (parowników) pompy ciepła typu bezpośrednio odparowanie/woda oraz z zastosowanych w instalacji badawczej oryginalnych, opracowanych przez Doktoranta rozwiązań w niej wykorzystanych;
- charakter innowacyjny opracowanej i przebadanej instalacji będący rezultatem zastosowania oryginalnych autorskich, chronionych patentami rozwiązań.

Strona redakcyjna rozprawy została oceniona w kolejnym rozdziale niniejszej opinii.

3. Uwagi krytyczne, uwagi redakcyjne

Należy podkreślić, że kompleks prac nad rozprawą był zapewne bardzo pracochłonny. Był to proces obejmujący: opracowanie koncepcji (w tym pomysłów chronionych patentami), a następnie budowę wielkoskalowego stanowiska badawczego, jego modyfikacje, opracowanie programu badań, zbierania oraz analizy danych pomiarowych, a także opracowanie i wykorzystanie rozwiązania służącego realizacji celu pracy. Duży nakład pracy na te czynności mógł stać się zapewne źródłem trudności w bezbłędnym przygotowaniu strony redakcyjnej. Po lekturze pracy uważam, że liczba usterek o charakterze redakcyjnym, w postaci literówek, pomyłek, jest w ocenianej rozprawie dość duża, choć może nie utrudnia w istotny sposób jej lektury.

Przykładowe usterki redakcyjne i drobne uwagi wymieniam poniżej:

str. 8, koniec czwartego i początek piątego wiersza od góry, typowa litówka: „*W układzie bezpośredniego odparowanie w gruncie*”;

str. 8, podpis pod rys.2: „*4. Dole źródło*” zamiast „*4 - dolne źródło*”;

str. 14, druga linia od dołu: „czynnik R410A wciąż jest najbardziej optymalnym”. Pojęcie „optymalny” nie podlega stopniowaniu;

str. 17, podpis pod rys. 9: „*entalpi*” zamiast „*entalpi*”;

str. 18, początek ostatniego akapitu: „*autorzy Mehedale i Radermacher prowadzili badania przepływu mieszaniny oleju czynnikiem chłodniczym w pionowych odcinkach ssawnych*”. Cytowany tekst zapewne wymaga wyjaśnienia;

str. 34, czwarta linia pod rys.16: „*przekrój rurociągu 10 mm*”. Wydaje się, że chodzi o średnicę;

str. 55, koniec drugiej i początek trzeciej linii od góry: „*w formie wykresu Rys 17*”. Tekst odnosi się do rys. 21;

str. 65, rysunek oznaczony numerem 5, w rzeczywistości powinien być to numer 25. Dalsze zauważone usterki tego typu zostaną wskazane Doktorantowi w opiniowanym egzemplarzu rozprawy.

W pracy przedstawione zostały wyniki badań dla układów oznaczonych przez Doktoranta jako Spr1, Spr2, Spr3. Układ Spr2 jest, jak wynika z treści rozprawy, dwupłaszczyznowy, układ Spr1 - jednopłaszczyznowy (str.63 rozprawy). W pracy nie udało mi się odnaleźć bezpośredniego objaśnienia co się kryje dokładnie za tymi oznaczeniami. Dopiero po ponownym przejrzaniu tekstu zauważyłem, że na stronie 35 objaśnienia takie zamieszczono dla układów oznaczonych jako Spr.1, Spr.2 oraz Spr.3. Używanie oznaczeń z pominięciem kropki okazało się źródłem niejednoznaczności.

Liczba usterek podobnych do wskazanych powyżej jest zauważalna. Usterki takie nie utrudniają co prawda, jak już wspomniałem, znacząco lektury. Pożądane jest jednak staranne przeredagowanie niektórych fragmentów tekstu, jeśli Doktorant chciałby wykorzystać je do ewentualnej publikacji. Dotyczy to także wykazu cytowanej literatury, gdzie dla pozycji oznaczonych numerami od 5 do 9 zabrakło informacji umożliwiających ich pełną identyfikację. Należy podkreślić, że przegląd literatury jest jednym z istotnych komponentów działań przygotowawczych w trakcie prac nad doktoratem. Ważne jest rozpoznanie stanu wiedzy, wskazanie luk, a także prac badawczych prowadzących do nowości naukowej. W rozprawie pojawia się informacja o tym, że w przypadku pomp ciepła typu bezpośrednio odparowanie/woda mamy do czynienia z rozwiązaniem niszowym oraz niewielką liczbą publikacji. Będę zobowiązany jednak za bliższy komentarz Doktoranta dotyczący stanu prac badawczych nad układami z pompami ciepła bezpośrednio odparowanie/woda w trakcie obrony i uzasadnieniem tak skromnej puli cytowanych prac.

Autor używa w rozprawie równolegle oznaczeń odnoszących się do skali temperatury wyrażanej w stopniach Celsjusza i Kelwina. Jak wynika z wykazu oznaczeń przyjął On skalę Celsjusza jako odnoszącą się do wszystkich oznaczeń temperatury, poza temperaturą przegrzania (a dokładniej, różnicą pomiędzy temperaturą nasycenia a temperaturą przegrzanego czynnika – w wykazie oznaczeń użyto symbolu ΔT_0) oznaczaną w skali Kelwina. Prowadzi to do niepotrzebnego zamieszania, tym

bardziej, że w tekście rozprawy w odniesieniu do temperatury przegrzania Doktorant zaniechał używania symbolu przyrostu Δ . W rezultacie w tekście pojawiają się opisy jak na przykład na stronie 42: Warunki niskotemperaturowe „ $T_z = 35^\circ\text{C}$, dla temperatury przegrzania $T_{oh} = 9\text{ K}$ oraz $T_{oh} = 13\text{ K}$ ”, podobne w dalszej części tekstu na tej stronie. Tak sformułowane zapisy powodują dezorientację w trakcie lektury.

Podpisy pod rysunkami oraz odnoszące się do zamieszczonych tabel są, moim zdaniem, często zbyt lakoniczne. Zazwyczaj komentarz objaśniający znajduje się co prawda w tekście, ale brak bliższych objaśnień dotyczących na przykład legendy (całostronicowe rys.20, czy rys.25), powoduje konieczność wertowania tekstu na sąsiednich stronach.

4. Ostateczna ocena pracy

Do szczególnie cennych osiągnięć Doktoranta w przedstawionej do recenzji rozprawie należy, według mojej oceny, zaliczyć:

- opracowanie i przebadanie tytułowego, innowacyjnego rozwiązania pomp ciepła typu bezpośrednio odparowanie/woda z układem odzyskiwania oleju z parowników gruntowych;
- wskazanie potencjalnych korzyści wynikających z elastycznego wymiarowania wymienników gruntowych w obiekcie rozważań.

W podsumowaniu opinii informuję, że przedstawione wcześniej uwagi krytyczne nie podważają pozytywnej oceny rozprawy. Uważam, że w szczególności należy podkreślić pracochłonność i aplikacyjny charakter tej pracy doktorskiej.

Autor rozprawy, mgr inż. Damian Pędziwiatr, wykazał się wiedzą teoretyczną, w dyscyplinie inżynieria mechaniczna (w której prowadzony jest przewód), niezbędną do przygotowania rozprawy. Wynika to z treści rozprawy, ale przede wszystkim z dorobku praktycznego, udokumentowanego uzyskanymi autorskimi zastrzeżeniami patentowymi Doktoranta.

Na podstawie przedstawionej do recenzji rozprawy stwierdzam, że jej Autor, mgr inż. Damian Pędziwiatr wykazał opanowanie podstaw teoretycznych badanego problemu, umiejętność formułowania zadania naukowego, znajomość stanu osiągnięć w obszarze wiedzy związanej z pracą oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia badań.

Będąca przedmiotem oceny rozprawa doktorska mgr inż. Damiana Pędziwiatra **pt.: „Badanie innowacyjnego układu odzyskiwania oleju z parowników gruntowych pomp ciepła typu bezpośrednio odparowanie/woda.”** spełnia wymogi określone w Ustawie Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce. W oparciu o powyższe stawiam wniosek o skierowanie rozprawy doktorskiej do publicznej obrony.