

prof. dr hab. inż. Beata Kowalska  
Katedra Zaopatrzenia w Wodę i Usuwania Ścieków  
Wydział Inżynierii Środowiska  
Politechnika Lubelska

Lublin, 28.08.2023 r.

## R E C E N Z J A

rozprawy doktorskiej **mgr inż. Beaty Piotrowskiej**  
pt. „ **Badania odzysku ciepła odpadowego w instalacjach kanalizacyjnych**  
**obiektów mieszkalnych**”

wykonanej pod kierunkiem Promotora prof. dr hab. inż. Daniela Słysia  
i Promotora pomocniczego dr inż. Kamila Pochwata

### **1. Podstawa prawna recenzji**

Podstawą wykonania recenzji była uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka na Wydziale Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury Politechniki Rzeszowskiej z dnia 12 lipca 2023 roku przekazana pismem Przewodniczącego Rady Dyscypliny prof. dr hab. inż. Daniela Słysia z dnia 14 lipca 2023 roku.

### **2. Ogólna charakterystyka rozprawy**

Rozprawa doktorska mgr inż. **Beaty Piotrowskiej** pt. „**Badania odzysku ciepła odpadowego w instalacjach kanalizacyjnych obiektów mieszkalnych**” została wydana drukiem jako 213-stronicowe opracowanie zawierające dodatkowo 72 załączniki na 108 stronach. W opracowaniu wyróżniono: wprowadzenie; cel, zakres i tezy pracy; przegląd literatury i uzasadnienie podjęcia tematu pracy; teoretyczne podstawy wymiany ciepła; konfiguracje instalacji przygotowania c.w.u. z odzyskiem ciepła; efektywność odbioru energii zdeponowanej w ściekach; efektywność finansowa odzysku ciepła odpadowego; rzeczywisty

model badawczy; charakterystyka czynnikowa modelu badawczego; plan badań; wyniki badań doświadczalnych w zakresie oceny efektywności temperaturowej pionowych wymienników ciepła; wyniki badań doświadczalnych w zakresie efektywności energetycznej odzysku energii cieplnej w instalacji kanalizacji i przygotowania c.w.u.; analiza efektywności finansowej systemu odzysku ciepła odpadowego w budynku mieszkalnym - przypadek studyjny; podsumowanie i wnioski końcowe; proponowane kierunki dalszych badań; bibliografia a także streszczenie w języku polskim i angielskim. Całość zamyka spis rysunków, tabel i załączników. W spisie bibliografii znajdują się 124 pozycje (w tym ponad 70% – w języku angielskim) oraz 17 źródeł internetowych. Większość cytowanych prac została opublikowana w ostatnich latach. Uwzględniając powyższe można stwierdzić, że pomimo, iż układ pracy jest nieco zbyt rozdrobniony (niektóre rozdziały można byłoby połączyć), zawiera on wszystkie elementy niezbędne do prawidłowego redagowania rozpraw doktorskich.

### 3. Ocena szczegółowa rozprawy

We **wprowadzeniu** nakreślono ogólnie problematykę dotyczącą tematyki poruszanej w rozprawie doktorskiej. Przedstawiono podstawowe problemy związane ze zmianami klimatycznymi, oraz zadania i strategię polskiej gospodarki zmierzające do osiągnięcia bezpieczeństwa energetycznego. Tematyka przedmiotowej rozprawy jest niezwykle aktualna, przedstawione badania związane z wykorzystaniem potencjału energii odpadowej, są kluczowym instrumentem na drodze ograniczenia gazów cieplarnianych.

Następnie przedstawiono **cel i zakres pracy**. Celem pracy była „Ocena systemu odzysku ciepła odpadowego ze ścieków szarych pod względem energetycznym w aspekcie jego wykorzystania do przygotowywania ciepłej wody użytkowej (c.w.u.) w obiektach mieszkalnych”.

Przyjęto następujący zakres badań:

- we wstępnym etapie badań dokonano charakterystyki czynnikowej modelu badawczego,
- na podstawie analizy literatury przyjęto trzy odmienne konfiguracje układów hydraulicznych systemów odzysku ciepła odpadowego ze ścieków szarych w instalacji przygotowanie ciepłej wody użytkowej,

- zaprojektowano i wykonano laboratoryjne stanowisko pomiarowe, na którym przeprowadzono badania odzysku ciepła ze ścieków szarych w warunkach zbliżonych do rzeczywistych,
- wyznaczono efektywność energetyczną  $\epsilon$  odzysku ciepła odpadowego dla trzech odmiennych konfiguracji systemu,
- przeprowadzono analizy finansowe kosztów cyklu życia (LCC) a także wrażliwości inwestycji związanej z montażem wymiennika ciepła pod kątem jej podatności na zmianę parametrów obliczeniowych modelu finansowego.

Sformułowano także następujące **tezy pracy**:

1. Odzysk ciepła odpadowego ze ścieków szarych w instalacjach kanalizacyjnych i przygotowania c.w.u. jest zasadny pod względem energetycznym dla każdej z trzech przyjętych w pracy konfiguracji układu hydraulicznego systemu DWHR (Drain Water Heat Recovery).

2. Wybór najbardziej korzystnej pod względem energetycznym konfiguracji systemu odzysku ciepła ma charakter indywidualny i wynika z preferencji decydentów dotyczących temperatury i zużycia wody do celów kąpielowych, a także jest uzależniony od projektu instalacji sanitarnych oraz sposobu przygotowania c.w.u. w budynku.

W rozdziale trzecim zamieszczono **przegląd literatury i uzasadnienie podjęcia tematu**, w którym przedstawiono aktualne rozwiązania techniczne urządzeń służących do odbioru ciepła w systemach kanalizacyjnych. Zwrócono także uwagę na strukturę zużycia energii w sektorze mieszkaniowym i korzyści jakie daje zastosowanie wymienników do odzysku ciepła ze ścieków szarych. Źródła literaturowe zostały starannie dobrane w ścisłym powiązaniu z tematyką pracy, przedstawiono zarówno badania i doświadczenia krajowe jak i zagraniczne. Informacje literaturowe w pełni uzasadniają podjęcie badań w zakresie przedstawionym w rozprawie.

Rozdział czwarty pt. „**Teoretyczne podstawy wymiany ciepła**” to w zasadzie kontynuacja przeglądu literatury. Zawarto w nim elementarne i powszechnie znane informacje dotyczące wymiany ciepła. W moim odczuciu ten punkt nic nie wnosi do treści pracy. Dodatkowo pojawiły się tu cytowania wtórne, przykładowo przy równaniu Newtona pojawia się odniesienie do źródła z 2010 r. W mojej opinii znacznie ciekawsze byłoby opisanie

i wyprowadzenie wzorów na efektywność temperaturową i energetyczną, których końcowe wersje znalazły się w rozdziale 6 rozprawy. Dodatkowo istotne są warunki, w jakich korzysta się z tych wzorów, zatem takie informacje byłyby cennym uzupełnieniem z zakresu wymiany ciepła bezpośrednio wykorzystanym w pracy.

W piątym rozdziale zatytułowanym „**Konfiguracje instalacji przygotowania c.w.u. z odzyskiem ciepła**” przedstawiono schematy trzech konfiguracji systemu odzysku ciepła ze ścieków szarych za pomocą wymiennika ciepła typu „rura w rurze”, które były przedmiotem analiz w części badawczej rozprawy. W rozdziale **szóstym i siódmym** przedstawiono wzory na efektywność temperaturową i energetyczną, a także finansową odzysku ciepła odpadowego. W moim odczuciu informacje te z powodzeniem mogłyby być umieszczone w części literaturowej, zwłaszcza, że treść obu punktów zajmuje zaledwie 2 oraz 4 strony.

Rozdział ósmy „**Rzeczywisty model badawczy**” to opis stanowiska pomiarowego, które zostało zbudowane przez Doktorantkę w Laboratorium Techniki Pomiarowych i Sterowania Transportem Wody i Ścieków Katedry infrastruktury i Gospodarki Wodnej Politechniki Rzeszowskiej. Stanowisko odzwierciedlające przybliżone warunki rzeczywiste indywidualnego przygotowania c.w.u. do zasilenia prysznic i odprowadzenia ścieków szarych poprzez wymiennik ciepła typu „rura w rurze” (DWHR) zostało wykorzystane w badaniach.

Rozdział dziewiąty pt. „**Charakterystyka czynnikowa modelu badawczego**” to opis zmiennych wejściowych i wyjściowych oraz parametrów stałych charakteryzujących obiekt badań, natomiast w rozdziale dziesiątym pt. „**Plan badań**” przedstawiono program badań doświadczalnych wraz z założeniami do poszczególnych konfiguracji hydraulicznych. Na wyróżnienie zasługuje przedstawienie planu badań w postaci schematu blokowego, co bardzo ułatwia zrozumienie poszczególnych etapów badań.

W rozdziale jedenastym „**Wyniki badań doświadczalnych w zakresie oceny efektywności temperaturowej  $\epsilon_T$  pionowych wymienników ciepła**” przedstawiono wyniki badań w formie tabelarycznej oraz w postaci wykresów dla różnych konfiguracji opisanych wcześniej, układów hydraulicznych. Podobny charakter prezentacji uzyskanych rezultatów zaprezentowano w rozdziale dwunastym zatytułowanym „**Wyniki badań doświadczalnych w zakresie efektywności energetycznej odzysku energii cieplnej w instalacji kanalizacji i przygotowania c.w.u.**” Obydwa rozdziały zostały napisane w sposób staranny i przejrzysty. Liczba analiz przeprowadzonych przez Doktorantkę zawierała 256 możliwych przypadków, a uwzględniając wykorzystanie dwóch jednostek DWHR o różnych długościach, łącznie przeanalizowano 1536

scenariuszy pomiarowych. Należy podkreślić, że jest to imponująca liczba przypadków jak na jedno zwarte opracowanie.

W kolejnym trzynastym rozdziale **pt. „Analiza efektywności finansowej sytemu odzysku ciepła odpadowego w budynku mieszkalnym - przypadek studyjny”** została przedstawiona analiza efektywności finansowej zastosowania systemu odzysku ciepła ze ścieków w budynku jednorodzinny. Tu również zostały przeanalizowane różne konfiguracje instalacji do przygotowania c.w.u., w tym układ konwencjonalny bez wymiennika ciepła. Niestety bardzo trudno jest odwzorować rzeczywiste warunki zużycia ciepłej wody, ze względu na dużą nierównomierność poboru wody, związaną między innymi z rytmem życia oraz indywidualnymi przyzwyczajeniami jej odbiorców, czy różnymi rozwiązaniami technicznymi stosowanej armatury. Ponadto w sieci wodociągowej występują wahania zarówno ciśnienia jak i temperatury, dlatego zasadne było przyjęcie wielu uproszczeń i porównanie otrzymanych rezultatów do wyników otrzymanych dla układu konwencjonalnego bez zastosowanego wymiennika ciepła DWHR.

W **podsumowaniu i wnioskach końcowych** zostały zaprezentowane najważniejsze wnioski wynikające z badań doświadczalnych, umożliwiające zweryfikowanie tez przedstawionych na początku pracy. W rozdziale piętnastym zaproponowano **kierunki dalszych badań**, zatem przedstawione w pracy badania nie stanowią zamkniętego obszaru, co daje szereg możliwości pogłębiania wiedzy z omawianego tematu. Warto tu wyróżnić zwłaszcza kierunek dotyczący wykorzystania metod numerycznych, ponieważ w tak skomplikowanych zagadnieniach mogą one stanowić doskonałe narzędzie do projektowania i symulacji pracy różnorodnych wariantów przy zmieniających się warunkach.

Analizując treść pracy, opis wyników i podsumowanie należy stwierdzić, że **cel główny pracy został w pełni osiągnięty i udokumentowany wynikami badań, a tezy badawcze zweryfikowane**. Przedstawione w rozprawie badania obejmują wykonanie bardzo dużej liczby analiz, czego następstwem jest bardzo bogaty materiał wynikowy. Wyniki zostały opracowane w formie przejrzystych wykresów oraz w tabelach zamieszczonych w tekście oraz w formie załączników.

Obszar badań wpisuje się w najnowsze problemy inżynierii środowiska w zakresie strategii osiągnięcia bezpieczeństwa energetycznego, w której zasadne są wszelkie działania mające na celu wzrost udziału odnawialnych źródeł energii we wszystkich sektorach gospodarczych. Ponadto inwestycje w energię odnawialną i wykorzystanie potencjału energii odpadowej są

kluczowym instrumentem na drodze ograniczenia gazów cieplarnianych. Można także stwierdzić, że tematyka badań wpisuje się w zagadnienia gospodarki o obiegu zamkniętym.

Wyniki badań mają wartość nie tylko poznawczą ale także aplikacyjną. Do najważniejszych osiągnięć wynikających z przeprowadzonych badań należy zaliczyć:

- wyznaczenie efektywności temperaturowej wymienników ciepła „rura w rurze” w przyjętych warunkach pomiarowych,
- wyznaczenie efektywności energetycznej dla różnych konfiguracji przygotowania c.w.u. z zastosowaniem wymienników DWHR,
- określenie efektywności finansowej systemu odzysku ciepła dla różnych konfiguracji hydraulicznych systemu.

Należy jednak podkreślić, że w przypadku zaprezentowanych wniosków znaczenie aplikacyjne ma jedynie konfiguracja II, mimo że nie jest ona najkorzystniejsza pod względem energetycznym. Wynika to z faktu obowiązku zapewnienia odpowiedniej temperatury podgrzewanej wody ciepłej co jest związane z ochroną przed Legionellą. Zgodnie z zapisem w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie: *„Instalacja ciepłej wody powinna zapewniać uzyskanie w punktach czerpalnych temperatury wody nie niższej niż 55°C i nie wyższej niż 60°C, przy czym instalacja ta powinna umożliwiać przeprowadzanie jej okresowej dezynfekcji termicznej przy temperaturze wody nie niższej niż 70°C”*. Stosowanie obejść, w których temperatura wody osiąga wartości 30-40°C, stwarza doskonałe warunki do rozwoju tych bakterii. Może warto zatem rozważyć konfigurację, w której cały objętościowy strumień wody zimnej kierowany jest do wstępnego podgrzania, a potem w całości kierowany jest do podgrzewacza wody ciepłej.

Oceniając rozprawę pod względem naukowym można stwierdzić, że badania zostały przeprowadzone właściwie, z wykorzystaniem odpowiednich narzędzi, a opracowanie stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Doktorantka poprawnie zaplanowała badania doświadczalne, przeprowadziła analizę czynnikową modelu badawczego, określając zmienne wejściowe oraz wyjściowe, zbudowała stanowisko pomiarowe, na którym przeprowadziła szereg badań przy różnych konfiguracjach hydraulicznych układu. Przedstawiona rozprawa doktorska prezentuje wysoki poziom merytoryczny, potwierdzający umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktorantkę, a uzyskane wyniki badań wnoszą wkład w dyscyplinę *inżynieria środowiska górnictwo i energetyka*.

#### 4. Uwagi edycyjne

Należy podkreślić, że praca została wykonana w sposób profesjonalny, zarówno w kwestii przeglądu literatury jak i organizacji badań i opisu wyników. W rozprawie znalazły się nieliczne niedociągnięcia edycyjne, które nie mają wpływu na ocenę strony merytorycznej rozprawy. Uwagi edycyjne to przykładowo:

- Na str. 44 i 45 – brak jednoznaczności oznaczania współczynników przenikania ciepła jest „k” lub „u”.
- We wzorze (4.23) przy ciepłe właściwym „p1” i „p2” powinny być indeksami dolnymi.
- Na rysunku 9.1 powinno być „zmiennie” wejściowe i wyjściowe, a nie parametry.
- Rysunek 10.1 – na rysunku opisano „efektywność energetyczna wymiennika”, natomiast w tekście jest - „efektywność energetyczna systemu”.
- Tabela 10.2. – gęstość jest fizyczną właściwością wody a nie ciepną.
- Ciśnienie i temperatura występują w liczbie pojedynczej, zmieniają się ich wartości (np. str. 37, 82).
- Na Rys. 8.2 przedstawiającym widok stanowiska powinny się znaleźć takie same oznaczenia poszczególnych elementów jak na schemacie widocznym na Rys. 8.1.

#### 5. Zagadnienia do wyjaśnienia/skomentowania

- a) Aby można było odwzorować przebieg eksperymentu należy dokładnie opisać metodykę wykonywania pomiaru dla poszczególnych serii pomiarowych.  
Czyli jak przebiegał proces pomiaru dla danej temperatury i natężenia przepływu? Ponieważ wykorzystana zależność opisująca efektywność energetyczną jest słuszna w warunkach ustalonych – w którym momencie prowadzenia pomiaru takie warunki zostały osiągnięte, po jakim czasie nie obserwowano wahań temperatury (wodociągowej oraz w systemie).
- b) Czy pomiar rozpoczął się od najmniejszych wartości natężenia przepływu, czy od największych? Przy małych natężeniach przepływu może występować zjawisko niepełnego zwilżenia ściekami szarymi wewnętrznej powierzchni miedzianej rury wymiennika, co może wpływać na uzyskane rezultaty.

c) Jakie były dokładności pomiarowe zastosowanych urządzeń?

## 6. Wniosek końcowy

Uwzględniając zakres badań przedstawiony w rozprawie doktorskiej mgr inż. Beaty Piotrowskiej pt. „Badania odzysku ciepła odpadowego w instalacjach kanalizacyjnych obiektów mieszkalnych”, stwierdzam, że opracowanie otrzymane do recenzji **spełnia warunki prawne określone dla rozpraw doktorskich w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce** (Dz.U. 2018, poz. 1668, z późniejszymi zmianami). Rozprawa doktorska powinna stanowić oryginalne rozwiązanie problemu oraz potwierdzać umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Przeprowadzone w pracy badania zostały wykonane właściwie, z wykorzystaniem odpowiednich narzędzi, a opracowanie stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Informacje literaturowe oraz dyskusja wyników potwierdzają wiedzę teoretyczną Doktorantki, a rzeczowe sprecyzowanie celu i zakresu badań, ich zaplanowanie, opis a także wyczerpująca interpretacja wyników świadczą o umiejętności samodzielnego prowadzenia badań.

Zatem wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynierii Środowiska, Górnictwa i Energetyki Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza o **dopuszczenie Pani mgr inż. Beaty Piotrowskiej do publicznej obrony rozprawy doktorskiej**. Ze względu na oryginalny i bardzo obszerny zakres badań wpisujący się w aktualne problemy związane z odzyskiem ciepła odpadowego ze ścieków, wnioskuję o wyróżnienie rozprawy.

*Beata Kowalska*

Lublin, dnia 28 sierpnia 2023 r.