

Gliwice, 28.08.2023

Recenzja rozprawy doktorskiej  
mgr inż. Beaty Piotrowskiej  
pt. "Badania odzysku ciepła odpadowego w instalacjach kanalizacyjnych obiektów  
mieszkalnych"  
wykonanej pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Daniela Słysia  
(Promotor pomocniczy dr inż. Kamil Pochwat)  
w Politechnice Rzeszowskiej

## 1. Podstawa opracowania

Niniejsza recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Pana prof. dr hab. inż. Daniela Słysia (pismo z dnia 14.07.2023r.). Dokumentacja wyłynęła do Biura Rektora/Sekcja Referatu Poczтового Politechniki Śląskiej 25 lipca 2023 r.

## 2. Wprowadzenie

Ambicją Unii Europejskiej jest, aby wszystkie budynki w Europie były bezemisyjne do roku 2050. W tym celu wprowadzono między innymi tzw. Europejski Zielony Ład (Green Deal) oraz pakiet Fit for 55, w ramach którego znowelizowano unijną dyrektywę dotyczącą efektywności energetycznej. Według nowych przepisów, UE ma zredukować zużycie końcowe energii o 11,7% do roku 2030 w porównaniu z rokiem 2020. Wymaga

to od państw członkowskich bardziej intensywnych wysiłków w dziedzinie efektywności energetycznej.

Biorąc pod uwagę te cele, poprawa efektywności energetycznej budynków stanowi kluczowy element polityki klimatycznej Unii Europejskiej. Sektor budowlany zostanie poddany większym wysiłkom w celu redukcji emisji. Dokument "Fala renowacji" odpowiada na wyzwanie związane z uczynieniem budynków w UE bardziej energooszczędnymi, mniej emisyjnymi w trakcie całego cyklu życia oraz bardziej zrównoważonymi.

"Fala renowacji" zawiera plan działań, w którym znajduje się zasada "efektywność energetyczna nade wszystko" oraz zasada redukcji emisji, propagowania odnawialnych źródeł energii, integracji lokalnych i regionalnych systemów energetycznych przy wykorzystaniu lokalnych odnawialnych źródeł energii oraz ciepła odpadowego. Ciepło odpadowe jest definiowane jako ciepło powstające w wyniku innych procesów, które nie jest wykorzystywane i często jest marnowane.

Praca doktorska inż. Beaty Piotrowskiej dotyczy oceny systemu odzysku ciepła odpadowego ze ścieków szarych pod kątem energetycznym, w kontekście jego wykorzystania do podgrzewania wody użytkowej w budynkach mieszkalnych. W świetle rosnącego nacisku na odzysk ciepła ze ścieków i systemów kanalizacyjnych zarówno w Europie, jak i na świecie, praca ta staje się istotna. Analizy wstępne sugerują, że pomimo znacznych kosztów inwestycyjnych budowy takich instalacji, ich opłacalność wyraża się w ciągu kilku lat, a koszty eksploatacji są niskie. Z tego powodu warto również w Polsce wykorzystać ciepło odpadowe z kanalizacji i ścieków. Niemniej jednak, temat ten wymaga nadal prowadzenia badań i prac rozwojowych.

Mając to wszystko na uwadze, uważam pracę doktorską inż. Beaty Piotrowskiej pt. "Badania odzysku ciepła odpadowego w instalacjach kanalizacyjnych obiektów mieszkalnych" za istotną zarówno z punktu widzenia poznawczego, jak i praktycznego, a jej tematykę za niezwykle aktualną.

### 3. Zakres i ocena rozprawy

Praca doktorska mgr inż. Beaty Piotrowskiej została napisana w języku polskim i składa się łącznie z 321 stron, zawierając 16 ponumerowanych rozdziałów, spis treści, streszczenia w języku polskim i angielskim, spis najważniejszych skrótów i symboli, bibliografię, spis rysunków i tabel oraz spis załączników - ich łączna liczba to aż imponujące 72. Praca zawiera 66 rysunków, 32 tabele oraz odnośniki do 141 źródeł literaturowych.

W rozdziale 1 (strony 15-18), zatytułowanym "Wprowadzenie", Autorka poruszyła bardzo istotny aspekt zmian klimatu oraz rolę działalności człowieka w anomalii klimatycznej. Szczególny nacisk położony jest na emisję dwutlenku węgla oraz konieczność ograniczenia średniej temperatury Ziemi zgodnie z tzw. porozumieniem paryskim. Doktorantka opisuje również kwestie formalno-prawne, które mają wspierać osiągnięcie neutralności klimatycznej. Wnioski płynące z analizy podstawowych dokumentów prawnych sugerują, że inwestycje w odnawialne źródła energii (OZE) oraz wykorzystanie potencjału energii odpadowej staną się kluczowe w tym kontekście. Kończąc ten rozdział, Doktorantka wskazuje na obiecujące możliwości wykorzystania ciepła odpadowego w kontekście mieszkalnictwa.

W Rozdziale 2 (strony 19-20) przedstawiono cele, zakres oraz tezy pracy. Głównym celem pracy jest „ocena systemu odzysku ciepła odpadowego ze ścieków szarych pod względem energetycznym w kontekście jego wykorzystania do podgrzewania ciepłej wody użytkowej (c.w.u.) w budynkach mieszkalnych”. Aby ten cel osiągnąć, mgr inż. Beata Piotrowska dokonała przeglądu stanu wiedzy na temat systemów możliwych do zastosowania w odzysku ciepła odpadowego w budynkach mieszkalnych. Następnie sformułowano założenia badawcze oraz opisano trzy konfiguracje układów hydraulicznych systemu odzysku ciepła odpadowego ze ścieków szarych i instalacji podgrzewania c.w.u.

W ramach badań eksperymentalnych zaprojektowano i zrealizowano stanowisko badawcze, umożliwiające przeprowadzenie badań w warunkach zbliżonych do rzeczywistych, obejmujących cały zakres zmienności parametrów wejściowych określonych w planie badawczym. Stworzono model symulacyjny, który pozwolił na określenie efektywności odzysku ciepła odpadowego oraz instalacji podgrzewania c.w.u. dla przyjętych konfiguracji. Przeprowadzono eksperymenty dotyczące efektywności temperaturowej dwóch wymienników ciepła typu „rura w rurze” o różnych parametrach technicznych. Analizowano także efektywność odzysku ciepła odpadowego oraz instalacji podgrzewania c.w.u. dla przyjętych konfiguracji w szerokim zakresie zmiennych warunków eksploatacyjnych. Ponadto, oszacowano koszty proponowanych rozwiązań. Doktorantka sformułowała dwie 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 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.

Przedstawione tezy są sformułowane prawidłowo i nie budzą zastrzeżeń.

W rozdziale 3 (str. 21-33) przedstawiono przegląd literatury oraz uzasadnienie podjęcia tematu pracy. Dokonano podziału wymienników ciepła jako elementów najbardziej efektywnych w systemach odbioru ciepła odpadowego w wewnętrznych instalacjach kanalizacyjnych. Opisano zasadę działania pionowego wymiennika typu „rura w rurze”. Stwierdzono, że wymienniki poziome mają niższą efektywność wymiany ciepła niż pionowe. Autorka dokonała porównania średniej efektywności wymiany ciepła odpadowego ze ścieków w zależności od wybranych parametrów charakteryzujących system odzysku ciepła. Omówiono problem odzysku ciepła na odpływie do sieci, w kolektorach kanalizacyjnych oraz na oczyszczalniach ścieków.

Ważną część tego rozdziału stanowi problem zużycia energii na cele ciepłej wody użytkowej (c.w.u.). Autorka wskazała na duży potencjał ścieków szarych jako źródła energii. Wprowadziła podział systemów kanalizacyjnych. Wnioski z przeprowadzonych studiów literaturowych nad istniejącymi rozwiązaniami pozwoliły stwierdzić konieczność prowadzenia badań nad poziomymi urządzeniami do odzysku ciepła odpadowego z tego rodzaju instalacji. W analizach uwzględniono także obiekty komercyjne, przemysłowe i komunalne, takie jak oczyszczalnie ścieków. Cały rozdział zakończono identyfikacją luk badawczych, które doktorantka planuje wypełnić, realizując swoją pracę doktorską.

Rozdział 4 (str. 34-46) stanowi omówienie teoretycznych podstaw wymiany ciepła. Autorka uwzględniła mechanizmy oraz podstawowe prawa przepływu ciepła. Omówiła problem ustalonego przepływu ciepła przez ścianę płaską i cylindryczną. Wydaje się jednak zbędne umieszczanie opisów wykorzystywanych oznaczeń przy przywoływanych równaniach, gdyż prowadzi to do wielokrotnego powtórzenia listy najważniejszych skrótów i symboli, którą autorka przygotowała we wstępie pracy.

W rozdziale 5 (str. 47-53) doktorantka opisała konfiguracje instalacji przygotowania c.w.u. z odzyskiem ciepła. Zaproponowano trzy konfiguracje, które zostały szczegółowo opisane oraz przedstawione na przygotowanych schematach rysunkowych.

W krótkim rozdziale 6 (str. 54-55) doktorantka przedstawiła zależności, które wykorzystano do określenia efektywności wydobycia energii zdeponowanej w ściekach. Są to efektywność temperaturowa wymiennika ciepła oraz efektywność systemu odzysku ciepła.

Rozdział 7 (str. 56-59) poświęcony jest analizie finansowej procesu odzysku ciepła odpadowego. Mgr inż. Beata Piotrowska przedstawiła w nim równania wykorzystywane do oceny ekonomicznej przedsięwzięcia.

W rozdziale 8 (str. 60-64) Doktorantka opisała stanowisko badawcze systemu odzysku ciepła w instalacji kanalizacyjnej i przygotowania c.w.u. wykorzystywane w badaniach.

Kolejny rozdział (str. 65-66) przedstawia parametry wejściowe zmiennych (temperatura wody zimnej, temperatura wody zmieszanej, czas użytkowania przyboru sanitarnego oraz strumień objętości wody zmieszanej na wyjściu z wylewki prysznic), parametry stałe (temperatura wody ciepłej na wyjściu z przepływowego podgrzewacza elektrycznego oraz temperatura otoczenia) oraz parametry wyjściowe (temperatura ścieków szarych na odpływie z wymiennika, efektywność temperaturowa oraz efektywność energetyczna).

W rozdziale 10 (str. 67-71) Doktorantka opisała plan badań z uwzględnieniem informacji nt. źródła pochodzenia danych wejściowych i wyjściowych. Przedstawione zostały założenia.

Rozdział 11 (str. 72-99) zawiera wyniki badań doświadczalnych w zakresie oceny efektywności temperaturowej pionowych wymienników ciepła dla poszczególnych Konfiguracji I, II i III.

W rozdziale 12 (str. 100-172) umieszczono wyniki badań doświadczalnych w zakresie efektywności energetycznej odzysku ciepła w instalacji kanalizacyjnej i przygotowania c.w.u. Uwzględniono wpływ czasu korzystania z przyboru sanitarnego, wpływ strumieni objętościowych wody i ścieków przepływających

przez wymiennik, wpływ innych parametrów wejściowych oraz wpływ różnicy temperatury między temperaturą ścieków i temperaturą wody wodociągowej na efektywność odzysku ciepła. Wyniki zestawiono w tabelach oraz na rysunkach, część umieszczono jako załączniki do pracy.

Rozdział 13 (str. 173-188) zawiera analizę efektywności finansowej systemu odzysku ciepła. Analizę tę przygotowano dla konkretnego przypadku, nazywając go 'studyjnym'. Uwzględniono 4 konfiguracje; trzy z nich to konfiguracje opisane w badaniach doświadczalnych jako I, II i III z wymiennikiem dłuższym o długości 1680 mm oraz konfiguracja 0, niezawierająca systemu odzysku ciepła. Doktorantka dokonała oceny kosztów cyklu życia dla ww. konfiguracji. Opisano zmienne wejściowe i wyjściowe wpływające na wyniki. Przeprowadzono analizę wrażliwości inwestycji.

W rozdziale 14 (str. 189-191) przedstawiono podsumowanie i wnioski końcowe.

Ostatni rozdział obejmuje opis proponowanych kierunków dalszych badań.

Za główne osiągnięcia Autorki pracy uważam:

1. Przeprowadzenie badań doświadczalnych w zakresie efektywności temperaturowej pionowych wymienników ciepła typu „rura w rurze” oraz przeprowadzenie badań efektywności odzysku ciepła odpadowego ze ścieków szarych w instalacji kanalizacyjnej i przygotowania ciepłej wody na cele użytkowe odwzorowując warunki w budynku mieszkalnym dla zdefiniowanych konfiguracji i zmiennych warunków eksploatacyjnych.
2. Wykonanie analizy kosztów cyklu życia systemu odzysku ciepła dla wybranego przypadku z uwzględnieniem wpływu zmian parametrów wejściowych na uzyskane efekty finansowe.
3. Wykazanie, że wśród założonych konfiguracji instalacji przygotowania ciepłej wody użytkowej z odzyskiem ciepła istnieje jedna, która jest najbardziej korzystna pod względem energetycznym dla całego zakresu analizowanych badań.
4. Wskazanie warunków, przy których inne z założonych konfiguracji instalacji przygotowania ciepłej wody użytkowej z odzyskiem ciepła mogą stać się opłacalne finansowo.
5. Mając na względzie własne wyniki badań, wskazanie przyszłym użytkownikom instalacji wyposażonych w system odzysku ciepła, że należy

stosować wodooszczędne słuchawki prysznicowe oraz aeratory. Ponadto wskazanie, że istnieje graniczna długość wymiennika ciepła dla określonych warunków projektowych i eksploatacyjnych, której zwiększenie nie powoduje poprawy efektywności temperaturowej i energetycznej.

**Podsumowując stwierdzam, że tytuł rozprawy obejmuje jej zakres. Geneza tematu i uzasadnienie celowości jego podjęcia jako problemu badawczego, wynikają z przeglądu stanu wiedzy. W rozprawie postawiono cel, tezę i określono zakres badań. Zdaniem recenzenta tematyka pracy jest oryginalna, aktualna i interesująca. Na uwagę zasługuje kompleksowy charakter prowadzonych badań.**

#### 4. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Poniżej przedstawiam uwagi krytyczne i dyskusyjne jakie nasunęły się podczas lektury pracy. **Moim zdaniem są one istotne dla dalszej dyskusji podczas publicznej obrony:**

1. Czy wykorzystany model badawczy jest na tyle uniwersalny, że mógłby być zastosowany przy innych „przyborach sanitarnych”, np. zmywarka, wanna, umywalka, zlewozmywak?
2. W tabeli 10.1. przedstawiono wartości zmiennych wejściowych określonych dla badanego modelu rzeczywistego systemu odzysku ciepła odpadowego. Na jakiej podstawie przyjęto założone wartości?
3. Jaka jest dokładność pomiarowa wartości charakterystycznych temperatur wody pokazanych w tabeli 11.1. i kolejnych, a także 12.1. i kolejnych itd.?
4. Wyniki dotyczące charakterystyki temperaturowej jednostek wymiany ciepła pokazały generalnie zasadę, że parametr ten wzrastał wraz ze zwiększaniem się różnicy pomiędzy temperaturą ścieków szarych, a temperaturą zimnej wody wodociągowej. Wyjątkiem była konfiguracja II – dlaczego?
5. W jaki sposób mogą zmienić się wyniki LCC, gdyby założyć, że w instalacji nie ma elektrycznego przepływowego podgrzewacza wody, ale zastosowany zostanie gazowy przepływowy podgrzewacz wody?

Podkreślić należy, że powyższe uwagi **mają charakter dyskusyjny i nie umniejszają wartości naukowej pracy i pozytywnej oceny pracy.**

Inne uwagi, w tym edycyjne i językowe:

1. Str. 9 -  $c_p$  winno być ciepło właściwe wody **przy stałym ciśnieniu**.
2. W całej pracy – doktorantka używa sformułowania „energia cieplna”; to jest błędne, bowiem ciepło jest tylko formą energii.
3. Strona 11 – symbol  $L$  jest wykorzystany do oznaczenia „długości”, ale także „liczby”.
4. Strona 11 - jest  $\dot{O}$ , ale winno chyba być  $\dot{Q}$ .
5. Unikanie stosowania układu SI; winno być K, a nie °C.
6. Strona 13 – winno być kinematyczny (zamiast kinetyczny) współczynnik lepkości oraz współczynnik lepkości dynamicznej (zamiast lepkość dynamiczna).
7. Tabela 10.2. – winno być J/(kg·K) (zamiast J/kgK)
8. Rysunek 10.1. – czy w dolnej części rysunku nie powinno być napisane Konfiguracja I, Konfiguracja II i Konfiguracja III?
9. Strona 72 – winno być „czasów korzystania z przyboru sanitarnego” (zamiast czasów trwania prysznic).
10. W całej pracy – należy zadbać o tę samą liczbę miejsc znaczących w tabelach z wynikami.

## 5. Wnioski końcowe

W podsumowaniu stwierdzam, że odnoszące się do rozprawy uwagi krytyczne nie mają wpływu na jej ocenę, która jest w pełni pozytywna i wysoka. Oceniana rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Doktorantka w pełni zrealizowała postawione cele. Uważam, że należy podkreślić kompleksowy charakter przeprowadzonych analiz. Autorka rozprawy, mgr inż. Beata Piotrowska wykazała się ogólną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka, niezbędną do przygotowania rozprawy. Wynika to jednoznacznie z treści pracy.

Na podstawie przedstawionej do recenzji pracy stwierdzam, że Doktorantka wykazała opanowanie podstaw teoretycznych badanego problemu, umiejętność formułowania zadania naukowego, znajomość stanu osiągnięć w obszarze wiedzy związanej z pracą oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia badań.



Stwierdzam, że przedłożona mi do recenzji rozprawa mgr inż. Beaty Piotrowskiej pt. "Badania odzysku ciepła odpadowego w instalacjach kanalizacyjnych obiektów mieszkalnych" spełnia wymagania Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce(Dz.U. 2023 poz. 742).

Zwracam się do Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Rzeszowskiej z wnioskiem o dopuszczenie mgr inż. Beaty Piotrowskiej do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Jednocześnie, mając na względzie szeroki zakres badań, ich kompleksowość oraz istotność z punktu widzenia perspektywy rozwoju instalacji odzysku ciepła w mieszkalnictwie indywidualnym, wnioskuję o wyróżnienie rozprawy.

28/08/23

Sebastian Mę



Politechnika  
Śląska



UCZELNIA  
BADAWCZA

Wydział Inżynierii i Techniki