

Prof. dr hab. inż. Dawid Taler
Politechnika Krakowska
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Katedra Procesów Ciepłych,
Ochrony Powietrza i Utylizacji Odpadów
ul. Warszawska 24
31-155 Kraków
tel. 0048 12 628 30 26
e-mail: dawid.taler@pk.edu.pl

Kraków, 02.12.2025 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Macieja Mazura
pt. „Metoda poprawy energooszczędności i sprawności urządzeń AGD“**

Recenzowana rozprawa o objętości 158 stron składa się z 8 rozdziałów. Na początku rozprawy znajduje się spis treści i wprowadzenie do problematyki badań. W rozdziale pierwszym znajduje się opis problemu badawczego i geneza problemu.

Na końcu rozprawy znajduje się bibliografia, która zawiera 154 prace oraz spis ilustracji, spis tabel i skrótów.

Promotorem pracy doktorskiej jest dr hab. inż. Wojciech Skarka, prof. nadzwyczajny Politechniki Śląskiej.

Promotorem pomocniczym jest dr Damian Kądziaława a opiekunem pomocniczym jest dr Andreas Pleschinger.

Przedmiotem rozprawy jest metoda poprawy energooszczędności i sprawności urządzeń AGD.

Według danych Eurostatu z 2022 roku gospodarstwa domowe mają 25,8% udziału w całkowitej ilości energii zużytej w Unii Europejskiej (UE). Autor rozprawy, mgr inż. Maciej Mazur zajął się w swojej pracy innowacyjnymi układami odzysku ciepła w urządzeniach AGD (artykułach gospodarstwa domowego) umożliwiającymi zwiększenie ich sprawności i obniżenie zużycia energii elektrycznej.

Tematyka rozprawy jest ważna i aktualna. Recenzowana rozprawa ma także duże znaczenie praktyczne.

1. Charakterystyka rozprawy

Rozdział 1 rozprawy stanowi wprowadzenie do problematyki badań.

Problem badawczy i geneza problemu omówione zostały odpowiednio w paragrafach 1.1 i 1.2.

W podpunkcie 1.2 omówiony jest rynek i standardowe rozwiązania techniczne w urządzeniach AGD.

W tabeli 1 zestawiono standardowe urządzenia AGD, takie jak: chłodziarki, pralki, zmywarki, suszarki i piekarniki oraz scharakteryzowano wyzwania związane z podniesieniem ich efektywności energetycznej. Autor wymienił następujące główne wady i ograniczenia wymienników stosowanych w sprzęcie AGD:

- ograniczona przestrzeń wewnątrz urządzeń,
- wysokie koszty wdrożenia nowych technologii odzysku ciepła,
- zanieczyszczenie wymienników ciepła występujące w niektórych urządzeniach AGD, w szczególności w domowych i przemysłowych zmywarkach.

Do najczęściej występujących przyczyn niskiej efektywności urządzeń AGD należą: straty ciepła odpadowego, nieefektywna wymiana ciepła oraz niska sprawność konwersji energii.

W podpunkcie 1.2.3 pt. „Obiekt badań – metody zarządzania energią cieplną i wymiany ciepła” zaproponowane zostały 3 innowacyjne koncepcje wymienników ciepła, których zadaniem jest zwiększenie efektywności energetycznej zmywarek poprzez maksymalizację odzysku ciepła.

Autor zaproponował zastosowanie: przeciwprądowego wymiennika ciepła do schładzania gorącej wody odpływowej przez zimną wodę zasilającą, wymiennika ciepła w bezszczotkowym silniku prądu stałego (BLDC) jako elementu chłodzącego stojan tego silnika oraz zastosowanie modułowych wymienników ciepła, które mogą być instalowane w ograniczonych przestrzeniach montażowych.

W paragrafie 1.3 przedstawiony został cel rozprawy jako poprawa konstrukcji wymienników ciepła w zmywarkach, co pozwoli znacznie zwiększyć efektywność energetyczną zmywarki i zmniejszyć zużycie wody.

Zaproponowane zostały następujące rozwiązania konstrukcyjne:

- zastosowanie przeciwprądowego wymiennika ciepła do wstępnego podgrzewania wody zimnej odpływową wodą gorącą ze zmywarki,
- modułowy wymiennik ciepła, który łatwo dostosować do specyficznych wymagań każdego urządzenia,
- właściwy dobór materiałów o wysokim współczynniku przewodzenia ciepła, odporności na korozję i wytrzymałości z uwzględnieniem trudnych warunków pracy materiałów wewnątrz zmywarki, tak aby zapewnić wysoką trwałość i niezawodność urządzenia.

Ponadto zaplanowane zostało modelowanie procesów przepływowo-cieplnych w zaprojektowanych układach wymienników ciepła przy zastosowaniu komercyjnych programów CFD. Badania laboratoryjne posłużyły do walidacji wyników symulacji komputerowych.

W paragrafie 1.4 sformułowana została teza rozprawy:

„Metoda integracji innowacyjnych układów odzysku ciepła w urządzeniach AGD umożliwia zwiększenie ich sprawności i obniżenie zużycia energii elektrycznej.

Zastosowanie trzech typów wymienników ciepła – na bocznej ścianie zmywarki, zintegrowanego ze stojanem silnika BLDC oraz modułowego układu odzysku ciepła – wykonanych z materiałów o wysokiej przewodności cieplnej i odporności na korozję, prowadzi do istotnej redukcji zużycia energii elektrycznej oraz strat cieplnych w urządzeniach AGD, przy zachowaniu dotychczasowych parametrów użytkowych i funkcjonalności.”

Rozdział 2 zawiera przegląd literatury i analizę aktualnego stanu wiedzy w zakresie konstrukcji i technologii energooszczędnych wymienników ciepła stosowanych w AGD.

Przegląd literatury podzielony został na 5 głównych obszarów:

- energooszczędność i efektywność w urządzeniach AGD,
- przegląd technologii wymienników ciepła w zmywarkach,
- parametry wpływające na wydajność wymienników ciepła,
- koncepcje konstrukcyjne wymienników ciepła i ich wpływ na efektywność,
- analiza materiałowa wymienników ciepła.

Z analizy dotychczasowego stanu literatury wynika potrzeba podjęcia własnych badań i prac konstrukcyjnych w zakresie udoskonalenia wymienników ciepła.

Przedmiotem rozdziału 3 jest dobór materiałów na elementy wymiennika ciepła. Omówione zostały kryteria wyboru stopów metali i kompozytów z uwagi na wartość współczynnika przewodzenia ciepła i odporność na korozję oraz zgodność chemiczną z detergentami. Przedstawione zostały również wyniki badań laboratoryjnych właściwości mechanicznych i eksploatacyjnych wybranych materiałów. Odporność korozyjną materiału oraz wpływ środowiska na powierzchnię próbek oceniano na podstawie badań zanurzeniowych. Badania te obejmowały ekspozycję próbek na działanie różnorodnych substancji chemicznych, typowych dla środowiska pracy występującego w urządzeniach AGD. Spośród wszystkich testowanych próbek tylko dwa materiały spełniły założone kryteria odporności i stabilności w warunkach laboratoryjnych: spiekany węgiel krzemu (SSiC) i stal nierdzewna o oznaczeniu 304ST.

W rozdziale 4 zaproponowano innowacyjne rozwiązania techniczne w urządzeniach AGD: przeciwprowodowy wymiennik ciepła instalowany na bocznej ścianie zmywarki, wymiennik ciepła wokół stojana silnika BLDC służący do odzysku ciepła oraz modułowy układ odzysku ciepła za pomocą wymiennika ciepła typu rura w rurze. Wymiennik ten może być stosowany w zmywarkach do wstępnego podgrzewania wody wykorzystując ciepło z wody odpływowej oraz w pralkach z systemem Eco, w których odzyskuje się ciepło z wody po praniu lub płukaniu, oddając je wodzie dolotowej do cyklu wstępnego.

Przedmiotem rozdziału 5 jest omówienie symulacji CFD procesów przepływowo-cieplnych w wymiennikach ciepła. Szczególnie dużo uwagi poświęcono modelowaniu CFD modułowego wymiennika ciepła typu rura w rurze. W szczelinie między rurą zewnętrzną a wewnętrzną umieszczona jest spiralna wkładka wymuszająca przepływ cieczy wokół rury wewnętrznej. Dzięki przepływowi cieczy przez spiralny kanał utworzony przez ścianki wkładki turbulizującej przepływ cieczy i przez powierzchnię zewnętrzną rury wewnętrznej oraz przez powierzchnię wewnętrzną rury zewnętrznej wzrasta współczynnik wnikania ciepła na powierzchni rury zewnętrznej.

Przedstawiono stanowisko badawcze wraz z przyrządami pomiarowymi oraz sposobem rejestracji danych pomiarowych.

Wyniki symulacji komputerowych i pomiarów laboratoryjnych przedstawiono w rozdziale 6.

Przedstawiono wyniki modelowania CFD następujących wymienników ciepła zainstalowanych w zmywarce:

- wymiennika ciepła zintegrowanego z boczną ścianą zmywarki (model turbulencji $k-\omega$ SST),
- wymiennika ciepła wokół stojana silnika BLDC (model turbulencji $k-\epsilon$ standard z enhanced wall treatment),
- modułowego przeciwprądowego wymiennika ciepła (moduł turbulencji $k-\epsilon$ realizable dla ANSYS oraz $k-\epsilon$ standard dla Solid Works).

Przeprowadzona została weryfikacja eksperymentalna modeli komputerowych wymienników ciepła. Badania przepływowo-ciepłne przeprowadzono na tych samych wymiennikach ciepła, na których przeprowadzone zostały symulacje CFD.

Na końcu paragrafu wyznaczono niepewności wyznaczania strumienia ciepła od wody gorącej do zimnej oraz niepewność pomiaru różnicy temperatury czynnika na wlocie i wylocie z wymiennika ciepła.

Analizę wyników obliczeń i pomiarów przedstawiono w rozdziale 7. Porównano zaproponowane w rozprawie rozwiązania konstrukcyjne do odzysku ciepła z gorącej wody odprowadzanej ze zmywarki oraz innowacyjny układu chłodzenia stojana silnika BLDC z istniejącymi na rynku rozwiązaniami.

Wnioski i uwagi końcowe zawiera rozdział 8. Omówiono najważniejsze osiągnięcia badawcze zaproponowane w rozprawie. Przedstawiono praktyczne rekomendacje dla producentów zmywarek. Wskazano także możliwości podniesienia efektywności energetycznej innych urządzeń gospodarstwa domowego, takich jak pralki i suszarki.

2. Charakterystyka najważniejszych osiągnięć naukowo-badawczych przedstawionych w rozprawie

Do najważniejszych osiągnięć naukowych mgr inż. Macieja Mazura można zaliczyć:

1. Postawiona w rozprawie teza pracy została udowodniona. Integracja innowacyjnych układów odzysku ciepła w urządzeniach AGD umożliwia zwiększenie ich sprawności i obniżenie zużycia energii elektrycznej. Zastosowane trzy typy wymienników ciepła – wymiennik na bocznej ścianie zmywarki, wymiennik ciepła zintegrowany ze stojanem silnika BLDC oraz modułowy układ odzysku ciepła przyczyniły się do znacznych oszczędności energii elektrycznej i ciepła. Wprowadzenie wymiennika ciepła przeciwprądowego na bocznej ścianie zmywarki poprawiło efektywność termiczną cyklu mycia. Zintegrowany wymiennik ciepła z silnikiem BLDC obniża temperaturę stojana silnika o 40 K (ze 140°C do 100°C). Dzięki zastosowaniu stojana silnika BLDC odzyskuje się 90% strat silnika.
2. Modułowa konstrukcja wymiennika ciepła umożliwia łatwą adaptację wymienników do różnych urządzeń AGD. Konstrukcja trzech zaproponowanych wariantów wymienników przeciwprądowych o nazwach „Mini”, „Twister” i „Płaszczowy – szeroki” może być łatwo dostosowana do specyficznych wymagań występujących w danym urządzeniu AGD.

3. Przeprowadzone testy zanurzeniowe pokazały, że spiekany węgiel krzemu (SSiC) i stal nierdzewna 304 ST są w pełni odporne na agresywne detergenty. Stopy aluminium i aluminium z powłoką ceramiczną nie spełniły kryteriów odporności na korozję, i co za tym, idzie nie nadają się do długotrwałej eksploatacji w zmywarkach.
4. Na podkreślenie zasługują obszernie badania eksperymentalne wymienników ciepła, które mogą być stosowane w urządzeniach AGD. Mgr inż. Maciej Mazur przeprowadził badania przepływowo-ciepłne wymienników stosowanych w obecnie istniejących zmywarkach, jak również przeprowadził badania nowych konstrukcji wymienników ciepła opisanych w rozprawie.

3. Uwagi krytyczne

W pracy występują następujące niedociągnięcia:

W rozprawie używana jest często niewłaściwa terminologia techniczna.

- 3.1 W tablicy 14 zamiast „strumień masy” używane jest określenie „natężenie przepływu masy”.
- 3.2 Autor często myli współczynnik przenikania ciepła U ze współczynnikiem przejmowania (wnikania) ciepła α . Przykładem takiej pomyłki jest wzór 14, gdzie zamiast α powinno być U . We wzorze 7 powinno być α zamiast h . Na stronie 107 zamiast „Wyliczony współczynnik przejmowania ciepła $\alpha = 566 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ” powinno być „Wyliczony współczynnik przenikania ciepła $U = 566 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ”. W tablicy 15 na stronie 107 zamiast „Maksymalna lokalna zmienność ΔT ” powinno być „Średnia logarytmiczna różnica temperatur ΔT_{lm} ”. Ponadto w tej samej tabeli powinno być ΔT_{lm} zamiast LMTD (druga i trzecia kolumna w tablicy 15). Na stronie 92 niepotrzebne jest słowo „transjenta”. Tytuł paragrafu 5.1 „Badania numeryczne” jest niewłaściwy. Można było na przykład napisać „Modelowanie numeryczne” lub „Modelowanie komputerowe” albo też „Symulacje komputerowe”.
- 3.3 Na rysunkach 24, 25, 28, 30, 32, 34 i 36 brak jest tytułów osi. Na osi y powinno być „Temperatura” a na osi x „Czas”.
- 3.4 Z analizy wyników przedstawionych na rysunkach 25, 34 i 36 widać, że w czasie pomiarów nie osiągnięto stanu ustalonego. Może to być przyczyną znacznych różnic między obliczonymi a zmierzonymi strumieniami ciepła przekazywanego od wody gorącej do zimnej.
- 3.5 W podpunkcie 6.1.3 pt. „Efektywność modułowego wymiennika ciepła” przedstawiono wyniki modelowania przepływu i wymiany ciepła w wymienniku ciepła typu rura w rurze za pomocą 2 programów – Ansys-Fluent oraz SolidWorks Flow Simulation. Wyniki otrzymane przy użyciu obydwu programów znacznie się różnią.
Czy przyczyną tych różnic jest zbyt rzadka siatka elementów skończonych?
Czy Autor przeprowadził testy obliczeniowe przy podziale modelowanego obszaru na różną liczbę elementów skończonych? Liczba elementów skończonych powinna być na tyle duża, że dalsze jej podwyższanie nie powoduje znacznej zmiany uzyskanych wyników.

- 3.6 W Tablicy 18 pt. „Studium niepewności – pomiary temperatury i wpływ na $\dot{Q}$ ” w ostatniej kolumnie podana jest połowa 95% przedziału ufności. Wartość $U(95\%)$ powinna być podana w watach (W), np. zamiast 169,76 powinno być $\pm 169,76$ oraz w tytule kolumny powinno być [W].
- 3.7 W przypadku wymiennika HRS połowa 95% przedziału ufności wynosi 712,55 W (Tablica 18), podczas gdy obliczona moc wymiennika ciepła wynosi tylko $\dot{Q} = 25$ W. Przyczyną tak dużej niepewności wyznaczania $\dot{Q}$ było zastosowanie termoelementu typu K o błędzie pomiaru $\pm 2,5^\circ\text{C}$, podanym przez producenta termoelementu. Dlaczego Autor nie zastosował wstępnej kalibracji zastosowanych termoelementów w piecu kalibracyjnym ?
- Niepewność pomiaru temperatury wody można byłoby zmniejszyć nawet do $\pm 0,1$ K .

Zauważone usterki mogą być poprawione w przyszłych publikacjach wyników uzyskanych w recenzowanej rozprawie doktorskiej.

4. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr inż. Macieja Mazura spełnia wszystkie wymagania ustawowe stawiane pracom doktorskim (art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dz. U. z 2024 r. poz. 1571).

Rozprawa wnosi istotny wkład w rozwój energooszczędnych wymienników ciepła stosowanych w urządzeniach AGD. Dzięki zaproponowanym w rozprawie wymiennikom ciepła o nowej konstrukcji można zmniejszyć zapotrzebowanie ciepła na podgrzewanie wody dopływającej do zmywarki, jak i również odzyskać ciepło chłodzenia silnika BLDC, który służy do napędu pompy zapewniającej cyrkulację wody pod odpowiednim ciśnieniem przez dysze natryskowe.

Oryginalny dorobek doktoranta stanowią także badania eksperymentalne zaproponowanych wymienników ciepła, które mogą znaleźć zastosowanie w zmywarkach naczyń.

Wnioskuje o dopuszczenie mgr inż. Macieja Mazura do publicznej obrony swojej rozprawy i o nadanie Mu stopnia naukowego doktora nauk technicznych.

prof. Dawid Taler

/podpis odręczny/

*wyłączenie jawności w zakresie danych osobowych oraz ochrony prywatności osoby fizycznej na podstawie art. 5 ust. 2 ustawy z dnia 6 września 2001 r. o dostępie do informacji publicznej (tj. Dz.U. z 2016 r., poz. 1764)