

Kraków 08.02.2026

Dr hab. inż. Krzysztof Kołodziejczyk, prof. AGH

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

Akademia Górniczo-Hutnicza

im. Stanisława Staszica w Krakowie

Al. A. Mickiewicza 30

30-059 Kraków

e-mail: krkolodz@agh.edu.pl

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
METODA POPRAWY ENERGOOSZCZĘDNOŚCI I SPRAWNOŚCI
URZĄDZEŃ AGD

autor rozprawy: mgr inż. Maciej Mazur

1. Podstawa formalna opracowania recenzji

Podstawą opracowania recenzji jest uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej z dnia 22 października 2025 r. w sprawie powołania recenzentów rozprawy doktorskiej mgr inż. Macieja Mazura oraz pismo dr hab. inż., prof. PŚ Alicji Piaseckiej-Belkhat, Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej, z dnia 23 października 2025 r. dotyczące wykonania recenzji przedmiotowej rozprawy.

Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Wojciech Skarka, prof. PŚ.

2. Wprowadzenie

Recenzowana praca została zrealizowana w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

Podjęta w pracy tematyka dotyczy poprawy efektywności energetycznej oraz ogólnej sprawności urządzeń AGD, którą Autor realizuje poprzez wdrożenie innowacyjnych metod zarządzania energią ciepłą oraz opracowanie zaawansowanych systemów wymiany ciepła. Obiektem badań i analiz wykorzystanym w pracy jest domowa zmywarka do naczyń, co w efekcie nadaje pracy charakter o dużym znaczeniu użytecznym z jednocześnie wysokim potencjałem wdrożeniowym. W pracy Autor podejmuje problem nieefektywnego

gospodarowania ciepłem odpadowym, które w tradycyjnych rozwiązaniach jest bezpowrotnie tracone wraz z odprowadzaną po procesie zmywania wodą, jak również jest rozpraszane do otoczenia przez pracujące moduły i urządzenia zmywarki w szczególności silnik. W pracy Autor proponuje trzy rozwiązania konstrukcyjne wymienników ciepła: przeciwprądowy wymiennik w ścianie bocznej zintegrowany z systemem przerwy powietrznej, system odzysku ciepła ze stojana silnika BLDC oraz wymiennik modułowy. Realizując pracę Autor wykorzystuje zarówno zaawansowane modelowanie numeryczne CFD jak również badania laboratoryjne połączone z analizą materiałową.

Podjęta przez Autora pracy tematyka w dobie zmian klimatycznych, podejmowanych przez społeczności międzynarodowe zobowiązań na rzecz ochrony klimatu jak np. porozumienie Paryskie (Paris Agreement, 2015) bądź Pakiet legislacyjny "Fit for 55", jest niezwykle aktualna, wpisuje się również w ideę zrównoważonego rozwoju poprzez optymalizację wykorzystania energii cieplnej, podniesienie sprawności układu, powodując tym zmniejszenie wykorzystania zasobów naturalnych (zmniejszenie zużycia energii elektrycznej wykorzystywanej do podgrzewania wody), zachowując jednocześnie pierwotną funkcjonalność urządzenia.

Celem rozprawy jest opracowanie metody i usprawnienie konstrukcji wymienników ciepła w zmywarkach, które umożliwią znaczne zwiększenie efektywności energetycznej i jednocześnie wpłyną na zmniejszenie zużycia wody.

Realizując cel rozprawy Autor podjął działania obejmujące:

- opracowanie wspomnianych już trzech innowacyjnych rozwiązań konstrukcyjnych wymienników;
- analizę doboru materiałów o wysokiej przewodności cieplnej, odporności na korozję i wytrzymałości w trudnych warunkach środowiskowych występujących we wnętrzu zmywarki;
- przeprowadzenia analiz bilansów termodynamicznych oraz wykonania modelowania numerycznego (CFD) pracy wymienników;
- przeprowadzenia badań laboratoryjnych na specjalnie przygotowanych stanowiskach laboratoryjnych w celu m.in. walidacji wyników symulacji oraz pozyskania danych do porównania efektywności opracowanych rozwiązań z tradycyjnymi układami wymiany ciepła stosowanymi w zmywarkach.

W pracy Autor sformułował tezę zgodnie z którą metoda integracji innowacyjnych układów odzysku ciepła w urządzeniach AGD umożliwia zwiększenie ich sprawności i obniżenie zużycia energii elektrycznej.

Autor zakłada, że zastosowanie wymienników przeciwprądowych, modułowych oraz zintegrowanych z silnikiem BLDC, wykonanych z odpowiednio dobranych materiałów, prowadzi do istotnej redukcji strat cieplnych przy zachowaniu dotychczasowych parametrów użytkowych urządzenia.

W pracy Autor sformułował również cztery hipotezy badawcze:

- H1 (energetyczna): wprowadzenie wymiennika przeciwprądowego poprawia sprawność termiczną cyklu mycia.
- H2 (integracyjna): zintegrowany wymiennik z silnikiem BLDC zmniejsza zużycie energii napędu.
- H3 (modułowa): modułowa konstrukcja umożliwia łatwą adaptację wymienników do różnych typów urządzeń AGD bez istotnych zmian konstrukcyjnych.
- H4 (materiałowa): zastosowanie materiałów o wysokiej przewodności cieplnej i odporności na korozję przedłuża bezawaryjny okres pracy wymiennika.

Podjęta tematyka z całą pewnością jest aktualna, realizuje wyzwania stawiane przed nauką i techniką w dobie kryzysu klimatycznego, poprzez optymalizację wykorzystania energii wpływa na zwiększenie efektywności energetycznej urządzenia, tym samym powoduje zmniejszenie zapotrzebowania na energię a poprzez to wpływa na redukcję emisji gazów cieplarnianych. Ważnym elementem świadczącym o istotności podjętego zagadnienia jest zakres i skala oddziaływania. Gospodarstwa domowe w UE odpowiadają za około 25% zużycia energii z czego znaczna część przypada na urządzenia AGD. Już niewielka poprawa efektywności urządzeń masowo wykorzystywanych przez społeczeństwo w globalnym bilansie zyskuje niebagatelne znaczenie.

3. Charakterystyka rozprawy

Przedłożona do recenzji rozprawa napisana jest w j. polskim i obejmuje 158 stron. Praca składa się z 8 rozdziałów merytorycznych uzupełnionych o rozdziały zawierające bibliografię, zestawienia rysunków, tabel oraz spis skrótów. Wykaz literatury zawiera 154 pozycje w tym raporty międzynarodowe, artykuły naukowe oraz patenty. Praca zawiera 37 rysunków, schematów i wykresów oraz 25 tabel.

Rozdział pierwszy zawiera wprowadzenie oraz uzasadnienie wyboru tematu rozprawy. Autor podkreśla znaczenie sektora AGD odpowiadającego za znaczną część globalnego zużycia energii. Na podstawie analizy źródeł strat energii w urządzeniach AGD Autor definiuje problem badawczy identyfikując luki w obszarze zarządzania energią, objawiające się stratami ciepła do otoczenia jak i nieefektywną konwersji energii na pracę mechaniczną. W rozdziale tym przedstawiony jest przytoczony wcześniej cel pracy oraz teza jak również cztery hipotezy badawcze.

Rozdział drugi zawiera rozpoznanie aktualnego stanu wiedzy, analizowana jest energooszczędność i efektywność urządzeń AGD, w tym różne koncepcje energooszczędności, statystyki zużycia energii jak również regulacje prawne. Zamieszczony jest przegląd i analiza istniejących technologii wymienników ciepła stosowanych w zmywarkach. Wykonana jest również analiza parametrów wpływających na efektywność energetyczną wymienników. Ponadto zostały przeanalizowane różne koncepcje konstrukcyjne w tym wymienniki spiralne, przeciwprądowe i modułowe. Istotnym elementem pracy, ujętym również w analizie stanu wiedzy, jest zwrócenie uwagi na materiały stosowane w wymiennikach ciepła w szczególności na ich przewodności cieplne, odporność na korozję oraz wytrzymałość w warunkach panujących w zmywarkach.

W rozdziale trzecim zatytułowanym „Dobór materiałów do wymienników ciepła” przeprowadzona jest analiza właściwości fizykochemicznych materiałów oraz wykonane są badania immersyjne pod kątem możliwości zastosowania wybranych materiałów w agresywnym środowisku zmywarki (wysokie pH, detergenty, cykle termiczne). Analizie zostają poddane materiały: stal nierdzewna 304ST, aluminium anodowane oraz z powłoką ceramiczną, stopy aluminium oraz spiekany węgiel krzemu. Na podstawie badań i analizy stal nierdzewną 304ST oraz spiekany węgiel krzemu (SSiC) wskazane są jako materiały zachowujące pełną odporność, z jednoczesną ograniczoną możliwością implementacji węgla krzemu.

Rozdział czwarty zawiera prezentację trzech autorskich rozwiązań konstrukcyjnych wymienników ciepła: przeciwprądowego wymiennika w ścianie bocznej zmywarki, wymiennika odzysku ciepła ze stojana silnika BLDC oraz przeciwprądowego modułowego układu odzysku ciepła. Wykonana jest analiza ich działania łącznie z przeliczeniem podstawowych parametrów pacy m.in. bilansem energetycznym, wyznaczeniem oporów przepływu oraz wpływem na efektywność energetyczną w różnych zastosowaniach.

W rozdziale piątym jest przedstawiony dwuetapowy schemat badań obejmujący symulacje numeryczne oraz badania laboratoryjne. Omówione są wykorzystane narzędzia, przedstawione są założenia symulacji jak również wykorzystane modele. Zamieszczone są również ogólne wizualizacje geometrii poszczególnych wymienników wykorzystanych w obliczeniach numerycznych łącznie z przyjętymi dla poszczególnych analiz parametrami symulacji w tym przyjętymi warunkami brzegowymi. Przedstawione są również stanowiska laboratoryjne wraz z metodyką badań.

W rozdziale szóstym zamieszczone zostały wyniki uzyskane z przeprowadzonych symulacji numerycznych oraz badań laboratoryjnych. W ramach prezentacji wyników z symulacji numerycznych zamieszczone zostały rozkłady temperatur uzyskane dla poszczególnych wymienników oraz mapa wektorów i rozkład prędkości dla wymiennika odbierającego ciepło z silnika BLDC. W przypadku modułowego wymiennika prezentowane są wyniki uzyskane z wykorzystaniem pakietu ANSYS Fluent oraz pakietu Flow Simulation modułu aplikacji SolidWorks. Wyniki badań laboratoryjnych prezentowane są w postaci przebiegów temperaturowych na wejściach i wyjściach z poszczególnych wymienników.

Rozdział siódmy zawiera analizę uzyskanych wyników łącznie z porównaniem z technologiami komercyjnymi oraz klasami efektywności energetycznej zmywarek.

Ósmy rozdział zawiera podsumowanie zrealizowanej pracy potwierdzenie zrealizowania postawionego celu i tezy pracy, jak również potwierdzenie zweryfikowania postawionych hipotez. Ponadto zostały sformułowane rekomendacje dla przemysłu AGD zawierające zalecenie standaryzacji modułów wymienników oraz wdrożenie analiz cyklu życia (LCA) i kosztów życia produktu (LCC). Wskazana została również potrzeba dalszych badań nad powłokami ochronnymi dla aluminium.

4. Ocena merytoryczna

Celem postawionym w pracy jest opracowanie metody i usprawnienie konstrukcji wymienników ciepła w zmywarkach, które pozwolą na znaczne zwiększenie efektywności energetycznej. Tak sformułowany cel wynika z identyfikacji luki badawczej w zakresie kompleksowego łączenia optymalizacji geometrycznej i materiałowej w oparciu o badania numeryczne i laboratoryjne jak

również analizy bilansowe strumieni ciepła pod kątem optymalizacji jego wykorzystania. Autor w pracy zmienia tradycyjne podejście inżynierskie traktujące ciepło odpadowe jako produkt uboczny do rozproszenia, traktując ciepło jako cenny zasób. W proponowanym podejściu Autor stosuje aktywną rekuperację w celu zwiększenia efektywności energetycznej całego urządzenia.

Do osiągnięć Autora należy zaliczyć kompleksowe podejście w celu poprawy efektywności energetycznej urządzenia. W swoim podejściu Autor proponuje integrację trzech autorskich konstrukcji wymienników ciepła: wymiennik w bocznej ścianie, układ chłodzenia silnika oraz wymiennik przeciwprądowy, z założeniem równoczesnego lub modułowego ich zastosowania. Proponuje zarządzanie ciepłem odpadowym z różnych źródeł: odzysk ciepła z wody odpływowej oraz przejmowanie ciepła generowanego przez stojan silnika BLDC. Przeprowadza analizę i badania materiałów pod kątem wysokiej przewodności cieplnej i pełnej odporności na agresywne środowisko chemiczne (detergenty, podwyższona temperatura). W prowadzonych pracach wykorzystuje zaawansowane modelowanie oraz walidację w oparciu o badania laboratoryjne. Integracja tych rozwiązań pozwala na realną poprawę wskaźnika efektywności energetycznej (EEI), co jest niezbędne do osiągnięcia wyższych klas energetycznych (A-C) według nowych norm UE. Jednocześnie zaproponowane przez Autora prace podejście uwzględniające analizę różnych źródeł ciepła odpadowego, propozycje różnych rozwiązań konstrukcyjnych wymienników umożliwiających jego odzysk łącznie z analizą materiałową dla proponowanych konstrukcji, z powodzeniem może być rozszerzone i stosowane do innych urządzeń AGD.

Postawiona w pracy teza, zgodnie z którą innowacyjna metoda integracji układów odzysku ciepła w urządzeniach AGD umożliwia zwiększenie ich sprawności i obniżenie zużycia energii elektrycznej, znajduje potwierdzenie w przeprowadzonych i przedstawionych w pracy badaniach, symulacjach i analizach. Korzystając z zaawansowanych metod wykorzystujących narzędzia numeryczne oraz badań laboratoryjnych uzyskano dane liczbowe wykazujące obniżenie zużycia energii przy zastosowaniu proponowanych przez Autora rozwiązań konstrukcyjnych wymienników. W pracy wykazano m.in. odzysk energii na poziomie 46,44 Wh/cykl dla wymiennika bocznego oraz potencjał modułowego wymiennika na poziomie 148 Wh/cykl. Również system odzysku ciepła z silnika pozwala na przejęcie ok. 90% strat cieplnych napędu i obniżenie temperatury

stojana o 40 °C, co realnie poprawia bilans energetyczny urządzenia i jednocześnie stanowi potwierdzenie postawionej tezy.

Sformułowane w pracy hipotezy: energetyczna, integracyjna, modułowa i materiałowa w większości w toku pracy zostały potwierdzone. W pracy wykazano, że wprowadzenie wymiennika przeciwprądowego umożliwia odzysk energii cieplnej z odprowadzanego strumienia wody, zmniejsza zapotrzebowanie na energię potrzebną do podgrzania wody doprowadzonej do zmywarki, tym samym poprawia sprawność termiczną cyklu mycia. Hipoteza integracyjna również została potwierdzona, zintegrowany wymiennik z silnikiem BLDC obniża temperaturę pracy silnika o 40 °C, co wpływa na zmniejszenie zużycie energii przez napęd. Hipoteza modułowa zgodnie z którą modułowa konstrukcja umożliwia łatwą adaptację wymienników do różnych typów urządzeń AGD bez istotnych zmian konstrukcyjnych została zweryfikowana w ramach badań laboratoryjnych, w trakcie których różne warianty geometrii (np. „Twister”, „Mini”) umożliwiły na elastyczne dostosowanie wymiennika do specyficznych wymagań konstrukcyjnych różnych urządzeń. Jednocześnie konkluzja stwierdzająca częściowe zweryfikowanie ostatniej hipotezy jest wątpliwa. W pracy Autor weryfikował przydatność różnych materiałów pod kątem ich odporności na działanie agresywnego środowiska w zmywarce. Natomiast nie prowadzono testów weryfikujących czy zastosowanie materiałów o wysokiej przewodności cieplnej i odporności na korozję przedłuża bezawaryjną pracę wymiennika. Taki efekt może być jedynie domniemywany natomiast nie był weryfikowany w toku prac.

Autor realizując pracę wykazał się umiejętnością rozwiązania złożonego zagadnienia, które wymagało zaplanowania i przeprowadzenia szeregu działań: zaprojektowane i wykonane zostały trzy rozwiązania konstrukcyjne wymienników ciepła, zostały zrealizowane symulacje numeryczne ich pracy, zbudowane zostały stanowiska badawcze do pomiaru parametrów pracy wymienników, przeprowadzona została weryfikacja wyników modelowania numerycznego oraz ocena skuteczności odzysku ciepła odpadowego. Realizowane prace wymagały przeprowadzenia pełnego procesu od koncepcji, przez projekt, analizy numeryczne, wytworzenie fizycznych prototypowych urządzeń i finalnie przeprowadzeniu badań laboratoryjnych. Tym samym Autor potwierdził umiejętność zaplanowania pracy badawczej, przeprowadzenia analiz i wyciągania wniosków, jak również prowadzenia badań laboratoryjnych oraz symulacyjnych.

Treść rozprawy jest zgodna z jej tematem. Kolejne rozdziały tworzą układ właściwy dla rozprawy naukowej. Autor osiągnął zamierzony cel, całość pracy stanowi wartościowe opracowanie, posiadające walory użyteczne.

Na podkreślenie zasługuje fakt iż wyniki zrealizowanej pracy mają znaczenie praktyczne, proponowane rozwiązanie posiada potencjał wdrożeniowy. Autor wykazał się dobrą znajomością zagadnień z kilku obszarów techniki, wykazał się znajomością technik doświadczalnych oraz zaawansowanych narzędzi modelowania komputerowego, jak również umiejętnością połączenia wiedzy teoretycznej, z praktycznym jej zastosowaniem.

Pracę oceniam pozytywnie; dostrzeżone usterki i uwagi zamieszczone poniżej na ogół mają charakter dyskusyjny.

5. Uwagi krytyczne

Uwagi ogólne:

- W badaniach zanurzeniowych (Immersyjnych) próbki zostały poddane wizualnej ocenie stanu powierzchni, czy w badaniach kontrolowana była zmiana masy poszczególnych próbek, dlaczego nie wprowadzono oceny kwantyfikowalnej, obiektywnej np. szybkości korozji lub % ubytek masy próbki.
- W rozdziale piątym przedstawione zostały modele geometryczne poszczególnych wymienników, opisane zostały przyjęte w poszczególnych analizach parametry, natomiast brak jest w pracy prezentacji modeli numerycznych z precyzyjnie określonymi przyjętymi warunkami brzegowymi, miejscem ich przypisania. Dla przykładu na rysunku 14 zaprezentowano układu chłodzenia silnika BLDC bez zaznaczonych miejsc przypisania warunków brzegowych. W opisie podano jedynie informację o „wlocie prędkościowym” i „wylocie ciśnieniowym”, nie podano żadnych informacji jakie warunki brzegowe zdefiniowano dla pozostałych powierzchni. Sposób prezentacji domeny obliczeniowej również nie umożliwia jej pełnej identyfikacji, w przestrzeni za silnikiem znajduje się geometria z adnotacją „zbiornik z wodą”, jednocześnie w tekście opisującym model brak jest informacji odnoszącej się do udziału tej geometrii w analizie. W efekcie nasuwają się pytania - jak zdefiniowano strumień ciepła generowany przez silnik, jak zdefiniowano warunki brzegowe dla silnika. Tak podana informacja nie daje możliwości oceny poprawności wykonania

symulacji numerycznych, które w dalszym toku pracy stanowią element prowadzonych analiz oraz formułowanych wniosków. W analogiczny sposób nie przedstawiono pełnej informacji o warunkach brzegowych modułowego wymiennika ciepła (rysunek 15), na którym również nie zaznaczono miejsc przypisania warunków brzegowych, nie podano również w jaki sposób zdefiniowano warunek brzegowy dla ścian zewnętrznych wymiennika.

- W pracy brak jest wizualizacji modeli podzielonych siatką numeryczną.
- Praca nie zawiera czytelnie podanej informacji dotyczącej weryfikacji jakości siatki obliczeniowej poszczególnych modeli obliczeniowych. Przedstawiona w Tabeli 12 informacja nie daje czytelnej informacji o przeprowadzonej weryfikacji. Jaki model, w jakich warunkach był analizowany. W rozdziale 5.1 zamieszczono informację o badaniu wpływu zagęszczenia siatki na rozwiązanie z informacją *„Wyniki studium (Tabela 12) przedstawiają zależność wybranego parametru jakościowego (np. Q) od zagęszczenia siatki”* – W tabeli 12 nie ma podanego parametru Q . Ponadto podana minimalna wartość „Orthogonal Quality” świadczy o siatce, bardzo słabej jakości, w praktyce mogącej powodować niestabilność obliczeń.
- Przyjęty ogólny podział pracy jest typowy dla prac naukowych zawiera wprowadzenie, przegląd stanu wiedzy, opis modeli i stanowisk badawczych, symulacje numeryczne, badania laboratoryjne, wyniki oraz ich analizę, całość spięta wnioskami i podsumowaniem. Jednakże ze względu na to iż w recenzowanej pracy przedmiotem analizy są trzy różne obiekty w kolejnych etapach pracy cyklicznie zmieniany jest analizowany obiekt. Takie zestawienie treści w znacznym stopniu utrudnia odbiór pracy i analizę uzyskanych wyników gdyż wymusza na odbiorcy cykliczne zmiany analizowanego wątku (obiektu). Znacznie lepszym rozwiązaniem zwiększającym czytelność pracy byłoby pogrupowanie osobno analiz numerycznych i osobno badań laboratoryjnych dla każdego wymiennika.
- W pracy brak jest czytelnej informacji w którym etapie cyklu zmywania pracują poszczególne systemy. W jaki sposób zorganizowany jest proces przepływu i magazynowania wody czystej i brudnej? Jak jest zsynchronizowana praca wymienników z cyklami pracy zmywarki.
- Wizualizacja koncepcyjnego rozwiązania wymiennika ciepła umiejscowionego w ścianie bocznej zmywarki (rysunek 7) jest przedstawiona w mało czytelny sposób w szczególności trudno jest

zidentyfikować jak w przedstawionej geometrii przepływa strumień wody zimnej? Biorąc pod uwagę iż jest to kluczowy element, stanowiący o innowacyjności pracy warto byłoby w sposób czytelny przedstawić zarówno konstrukcję jak i sposób jego działania. Tym bardziej że w pracy prowadzone są wyliczenia stanowiące podstawę analizy przydatności i skuteczności działania tego wymiennika.

- Na rysunku 18 (str. 98) zamieszczono rozkład temperatury w przekroju poprzecznym wymiennika ciepła umieszczonego w bocznej ścianie zmywarki. Analizując przedstawiony rozkład można zauważyć nieciągłości w rozkładzie temperatury (pasek niebieski po lewej stronie od przewodu z wysoką temperaturą oraz pole w dolnej części wymiennika). Jednocześnie zastanawiającym jest równomierny rozkład temperatury w pozostałej przestrzeni po lewej stronie od przewodu z czynnikiem o wysokiej temperaturze w szczególności biorąc pod uwagę informacje podane w rozdziale 5.1.1 podpunkt 3 Modelowanie wielofazowe, którego treść sugeruje że w pracy będą prowadzone obliczenia z układem dwufazowym z wykorzystaniem modelu VoF. Biorąc pod uwagę trzy modelowane wymienniki to właśnie wymiennik w ścianie bocznej spełniał warunki do modelowania w układzie wielofazowym, co trudno zauważyć w prezentowanym rozkładzie temperatury. W efekcie pytanie, czy przestrzeń wymiennika była w 100% wypełniona wodą, a jeżeli tak to w jaki sposób koresponduje to z rzeczywistą pracą takiego układu.
- Przedstawiony rozkład wektorów oraz kontury pola prędkości na rysunku 20 są mało czytelne, brak jest możliwości odczytania zakresu prędkości na prezentowanej skali, pomimo to można zauważyć że kontury rozkładu prędkości w płaszczu wodnym wskazują na wyższe wartości prędkości przepływu w strefie ściany wewnętrznej wymiennika niż w strefie ściany zewnętrznej, czym można wytłumaczyć taki niestandardowy rozkład prędkości przy przepływie przez wymiennik.
- W przedstawionej w rozdziale 6.1.2 analizie wyników uzyskanych w symulacji pracy układu chłodzenia silnika BLDC nie podano informacji o temperaturze wody na wyjściu z wymiennika – przyrost temperatury wody chłodzącej silnik powinien stanowić podstawę wyznaczenia strumienia odbieranej energii cieplnej z silnika.

- W rozdziale 6.1.3 zamieszczono informację o czasie badania wynoszącym 120 s – czy poprzez to należy rozumieć, że prowadzona była analiza zmienna w czasie (transient)?
- Prezentacja graficzna wyników na rysunkach 21 i 22 zamieszczona jest w różnych skalach temperatury w efekcie porównanie wyników z dwóch analiz jest mocno utrudnione.
- W rozdziale 6 (str. 106) zawierającym wyniki badań prezentowane jest stanowisko badawcze, parametry prowadzonych pomiarów, jak również ponownie opisywana jest metodyka pomiarowa – zamieszczenie tych informacji w rozdziale zatytułowanym wyniki zaburza przyjęty ogólny układ pracy.
- Czy wykresy przedstawione na rysunku 2 str. 47 są opracowane przez Autora?
- Tabela 14 Parametry prędkości w symulacji – tytuł tabeli nie w pełni koreluje z jej zawartością.

Uwagi szczegółowe:

Praca zawiera znaczną liczbę usterek natury edycyjnej i stylistycznej. Z uwagi na ich licznosc, wskazanym byłoby poddać rozprawę profesjonalnej ocenie korektorskiej.

Wybrane błędy zamieszczono poniżej:

- brak powołania w tekście rozprawy pozycji literatury: 18, 65, 115, 139,
- str. 48 „Wykres 1 (lewy)” lub „Wykres 2 (prawy)” – zazwyczaj stosuje się dodatkowe oznaczenie np. „a, b itd.”,
- str. 95 „Metodologia badań” – metodologia to nauka o metodach, poprawnym określeniem będzie „metodyka badań”,
- brak konsekwencji w sposobie zapisu jednostek, czasami autor stosuje zapis $\lambda \approx 200 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, a czasami $k_{\text{wody}} \approx 0,6 [\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$,
- str. 48 – „moc cieplna będzie przez niego przepływać” – czy moc cieplna może przepływać?
- str. 49 – „Watów” -> „watów”,
- str. 50 – w jaki sposób koszt produkcji wpływa na przewodność cieplną materiału?
- str. 51 – „Na Rysunku 2 ...” – natomiast opis odnosi się do rys. 3,
- str. 61 – „w której znajduje wymiennika ciepła” – styl,

- str. 66 – „skąd grawitacyjnie odbiera ciepło” – znane mechanizmy wymiany ciepła to przewodzenie, konwekcja oraz promieniowanie,
- str. 67 m2 -> m²
- str. 68 - „odebrana ze stojanu” -> „odebrana ze stojana”,
- str. 69 – „najczęściej woda o wysokiej pojemności cieplnej” – co to jest pojemność cieplna wody?
- str. 76 – „Niższe zużycie prądu i redukcja kosztów eksploatacyjnych” – możemy zmniejszyć zużycie energii a nie prądu!
- str. 98 – „ostateczny” -> „ostatni”,
- str. 106 – rysunek 24 – brak opisu osi, skala nieczytelna,
- str. 108 – na rysunku 25 mamy przedstawiony zapis dla 6-ciu przebiegów, natomiast w pracy jest informacja o 3 mierzonych temperaturach,
- str. 110 – rysunek 28 – brak opisu osi,
- str. 117 – Tabela 18 - ΔT zastosowane w obliczeniach podane jako $Q \approx 25$ W?

6. Wnioski końcowe

Praca ma charakter interdyscyplinarny, łączący aspekty inżynierii materiałowej, mechaniki płynów, wymiany ciepła w zastosowaniu do konstrukcji urządzeń AGD. W pracy uwzględniono zarówno analizę teoretyczną poruszanych zagadnień, badania symulacyjne jak również badania laboratoryjne.

Zrealizowane prace obejmują szczegółowy przegląd literatury, badania i dobór materiałów z uwzględnieniem właściwości cieplnych i chemicznych, projekt koncepcyjny i szczegółową analizę wymienników: przeciwprądowego, zintegrowanego z silnikiem BLDC oraz modułowego. W ramach pracy zrealizowano badania numeryczne (CFD) i empiryczne (testy laboratoryjne) wraz z walidacją uzyskanych wyników. W ramach rozprawy szczególną uwagę zwrócono na praktyczne aspekty wdrożenia, takie jak możliwość integracji z istniejącymi konstrukcjami zmywarek, koszty materiałowe, odporność na czynniki chemiczne występujące w środowisku pracy oraz potencjalne korzyści dla użytkowników i producentów. Analizy uwzględniały również zgodność z aktualnymi trendami oraz wymaganiami regulacyjnymi dotyczącymi efektywności energetycznej urządzeń AGD.

W opiniowanej pracy Autor nie ustrzegł się błędów i niedociągnięć. W szczególności wiele pytań dotyczy przeprowadzonych symulacji numerycznych i niewystarczającego bądź mało precyzyjnego opisu zrealizowanych obliczeń

numerycznych. Skrótkowo przedstawione fragmenty, które w ocenie recenzenta wymagałyby szerszego opisu mogą wynikać z szeregu zagadnień poruszonych w pracy oraz obszernego zakresu wykonanych prac i analiz.

Niezależnie od wskazanych usterek podjęcie tematu badawczego rozprawy doktorskiej uważam za celowe i prawidłowo uzasadnione. Doktorant posiada odpowiednie przygotowanie dla rozwiązywania postawionych problemów naukowych, co wykazał w przedmiotowej rozprawie. Doktorant wykazał się szeroką wiedzą teoretyczną oraz umiejętnością prowadzenia pracy naukowej. Recenzowana rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie postawionego problemu badawczego dotyczącego opracowania metody poprawy energooszczędności i sprawności urządzeń AGD. Rozprawa doktorska mgr inż. Macieja Mazura wnosi istotny wkład w rozwój wiedzy w dyscyplinie inżynieria mechaniczna szczególnie w zakresie użytkowym.

Stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska mgra inż. Macieja Mazura pt. „Metoda poprawy energooszczędności i sprawności urządzeń AGD” przygotowana pod opieką promotora - dra hab. inż. Wojciecha Skarki, prof. PŚ, spełnia wszystkie warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2024 r., poz. 1571 ze zm.). W związku z powyższym wnoszę o przyjęcie recenzowanej rozprawy doktorskiej przez Radę Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

dr hab. inż. Krzysztof Kołodziejczyk, prof. AGH

/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)