

Politechnika Śląska
Wydział Mechaniczny Technologiczny
Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn

ROZPRAWA DOKTORSKA

Metoda poprawy energooszczędności i sprawności
urządzeń AGD

mgr inż. Maciej Mazur

Promotor:

dr hab. inż. Wojciech Skarka prof. nzw. Pol. Śl.

Promotor pomocniczy: dr Damian Kądziaława

Opiekun pomocniczy: dr Andreas Pleschinger

Gliwice 2025

Niniejsza rozprawa doktorska jest rezultatem wieloletnich badań nad projektowaniem, budową i udoskonaleniem układów stosowanych w branży urządzeń AGD. Znaczna część badań została przeprowadzona w trakcie mojej pracy w firmie Sanhua-Aweco, gdzie miałem możliwość wdrażania rozwiązań poprawiających jakość produktów, zgodnie z dynamicznie zmieniającymi się wymaganiami rynkowymi.

Sukces tego przedsięwzięcia nie byłby możliwy bez wsparcia i zaangażowania wielu osób. Pragnę wyrazić szczególną wdzięczność moim współpracownikom naukowym: dr Andreas Pleschinger oraz dr Damian Kądziaława, za ich cenne wskazówki, czas i zaangażowanie, które niejednokrotnie wykraczało poza standardowe obowiązki. Podziękowania kieruję także do zarządu firmy Sanhua-Aweco oraz współpracowników z biura, którzy wspierali mnie na każdym etapie realizacji tego projektu.

Szczególne wyrazy uznania składam na ręce mojego promotora, dr. hab. inż. Wojciecha Skarki, prof. PŚ, za jego nieocenioną pomoc, cierpliwość oraz inspirujące rozmowy, które wielokrotnie wyznaczały nowe kierunki w moich badaniach.

Wreszcie, chciałbym podziękować mojej rodzinie: żonie Marcie oraz dzieciom, Aleksiowi i Julci, za ich nieustające wsparcie, cierpliwość i wiarę we mnie, które były dla mnie motywacją w najtrudniejszych chwilach. Dziękuję także moim rodzicom za ich niezmiennie wsparcie i nadzieję, którą we mnie pokładali.

Dziękuję Wam wszystkim za wkład w realizację tego przedsięwzięcia, które, mam nadzieję, przyczyni się do dalszego rozwoju wiedzy i technologii w dziedzinie energooszczędnych rozwiązań dla urządzeń AGD.

Spis Treści

1.	Wprowadzenie do problematyki badań	5
1.1.	Problem badawczy	6
1.2.	Geneza problemu	7
1.2.1.	Rynek i standardowe rozwiązania w urządzeniach AGD	8
1.2.2.	Problemy obecnych rozwiązań i zmiany prawne	11
1.2.3.	Obiekt badań – metody zarządzania energią ciepłą i wymiany ciepła.....	12
1.3.	Cel rozprawy	15
1.4.	Teza rozprawy	16
1.5.	Zakres rozprawy	17
2.	Przegląd literatury i stanu wiedzy	20
2.1.	Energooszczędność i efektywność w urządzeniach AGD	21
2.2.	Przegląd technologii wymienników ciepła w urządzeniach AGD.....	26
2.3.	Parametry wpływające na wydajność wymienników ciepła	27
2.4.	Koncepcje konstrukcyjne wymienników ciepła i ich wpływ na efektywność.	30
2.5.	Analiza materiałowa wymienników ciepła	32
2.6.	Typowe warunki panujące w zmywarce	37
3.	Dobór materiałów do wymienników ciepła	40
3.1.	Charakterystyka materiałów.....	40
3.2.	Odporność na korozję i działanie detergentów	50
3.3.	Badania laboratoryjne materiałów	54
4.	Opracowanie innowacyjnych rozwiązań w urządzeniach AGD	60
4.1.	Przeciwbieżny wymiennik ciepła na bocznej ścianie zmywarki	60
4.1.1.	Konstrukcja i zasada działania	61
4.1.2.	Analiza efektywności energetycznej i potencjalnych korzyści.....	62
4.2.	Wymiennik ciepła w silniku BLDC	64
4.2.1.	Konstrukcja i integracja z układem silnika	64
4.2.2.	Mechanizm chłodzenia silnika w systemie HRS	66
4.2.3.	Wpływ na sprawność energetyczną i chłodzenie silnika	68
4.3.	Modułowy wymiennik ciepła.....	69
4.3.1.	Charakterystyka konstrukcji modułowego wymiennika	71
4.3.2.	Analiza wydajności energetycznej i potencjalne zastosowania w AGD	73
4.3.3.	Wpływ na efektywność energetyczną w różnych urządzeniach	75
5.	Metodyka	77
5.1.	Badania numeryczne	79
5.1.1.	Wprowadzenie do badań numerycznych: narzędzia i założenia modelowania	80

5.1.2.	Przeciwbieżny wymiennik ciepła na bocznej ścianie.....	84
5.1.3.	Wymiennik ciepła wokół stojanu silnika BLDC	87
5.1.4.	Modułowy wymiennik ciepła	89
5.2.	Badania laboratoryjne	92
5.2.1.	Opis stanowiska badawczego	93
5.2.2.	Metodyka przeprowadzania badań laboratoryjnych.....	95
6.	Wyniki badań numerycznych i laboratoryjnych	97
6.1.	Wyniki badań numerycznych	97
6.1.1.	Efektywność wymiany ciepła w wymienniku na bocznej ścianie zmywarki...98	
6.1.2.	Analiza wymiany ciepła w wymienniku wokół stojanu silnika	99
6.1.3.	Efektywność modułowego wymiennika ciepła	101
6.2.	Wyniki badań laboratoryjnych	104
6.2.1.	Testy wymiennika na bocznej ścianie zmywarki	104
6.2.2.	Testy wymiennika HRS.....	107
6.2.3.	Wyniki modułowego wymiennika ciepła	108
6.2.4.	Walidacja i analiza niepewności.....	115
7.	Analiza wyników i ocena efektywności	120
7.1.	Porównanie z tradycyjnymi rozwiązaniami rynkowymi	120
7.2.	Wyzwania i ograniczenia wdrożeniowe	126
8.	Wnioski i rekomendacje	129
8.1.	Kluczowe wyniki badań i weryfikacja tezy	129
8.2.	Kierunki dalszych badań i rekomendacje dla przemysłu AGD.....	138
	Bibliografia.....	141
	Spis ilustracji	156
	Spis tabel	157
	Spis skrótów	158

1. Wprowadzenie do problematyki badań

Globalne dążenie do zrównoważonego rozwoju i przeciwdziałania zmianom klimatycznym stanowi jedno z najpoważniejszych wyzwań stojących przed sektorem energetycznym i przemysłem. Konieczność radykalnej redukcji emisji gazów cieplarnianych oraz ograniczenia eksploatacji zasobów naturalnych zmusza do intensywnego poszukiwania i wdrażania efektywnych rozwiązań we wszystkich sferach działalności człowieka. Raport IPCC z 2023 roku jednoznacznie potwierdza, że działalność człowieka jest główną przyczyną globalnego ocieplenia, a konsekwencje tych zmian są już widoczne na całym świecie [1-3]. W tym kontekście, efektywność energetyczna jawi się jako jeden z fundamentalnych filarów transformacji energetycznej, oferując znaczący potencjał oszczędności energii przy jednoczesnym zachowaniu lub nawet podniesieniu standardu życia. Międzynarodowa Agencja Energetyczna (IEA) w swoich publikacjach, takich jak "Energy Efficiency 2024", konsekwentnie podkreśla, że efektywność energetyczna jest kluczowym elementem w osiągnięciu celów klimatycznych i budowaniu bezpiecznego systemu energetycznego [4].

Sektor gospodarstw domowych odgrywa niebagatelną rolę w globalnym zużyciu energii, a urządzenia gospodarstwa domowego (AGD) stanowią znaczną część tego zapotrzebowania na energię elektryczną i inne media, takie jak woda. Dane Eurostatu z 2022 roku wskazują, że gospodarstwa domowe w Unii Europejskiej odpowiadały za 25,8% końcowego zużycia energii, przy czym dominującym zastosowaniem było ogrzewanie przestrzeni [5,6]. Szczegółowe zużycie energii przedstawia Tabela 1.

W Polsce, według danych Głównego Urzędu Statystycznego z 2021 roku, udział gospodarstw domowych w krajowym zużyciu energii (bez paliw silnikowych) wyniósł 20,2% [7]. Urządzenia takie jak lodówki, pralki, zmywarki, suszarki i piekarniki, choć niezaprzeczalnie ułatwiają codzienne funkcjonowanie, w skali globalnej generują znaczące obciążenie dla systemów energetycznych i środowiska. Ich ciągła praca lub cykliczne wykorzystywanie procesów wymagających dużych nakładów energii (chłodzenie, grzanie, ruch mechaniczny) sprawia, że nawet niewielka poprawa efektywności pojedynczego urządzenia, pomnożona przez ich ogromną liczbę na rynku, przekłada się na istotne korzyści w skali makro. Badania nad potencjałem oszczędności energii w sektorze AGD, takie jak analiza przeprowadzona w Chinach dotycząca lodówek, pokazują, że optymalizacja zarówno wyborów konsumenckich, jak i wzorców użytkowania może

prorowadzić do znaczących redukcji zużycia energii na poziomie krajowym [8]. Z tego względu, poszukiwanie metod zwiększenia energooszczędności i ogólnej sprawności urządzeń AGD ma fundamentalne znaczenie zarówno z perspektywy ekonomicznej, jak i środowiskowej.

Tabela 1. Zużycie energii w gospodarstwach domowych w UE według zastosowania (2022)

Zastosowanie energii	Zużycie energii (TJ)	Udział procentowy (%)
Ogrzewanie przestrzeni	6405,4	63,5
Ogrzewanie wody	1500,9	14,9
Oświetlenie i urządzenia elektryczne	1407,4	13,9
Gotowanie	635,2	6,3
Chłodzenie przestrzeni	60,6	0,6
Inne zastosowania	91,5	0,9
Łącznie	10100,9	100,0

1.1. Problem badawczy

Pomimo ciągłego postępu technologicznego i dynamicznego wprowadzania przez producentów coraz bardziej zaawansowanych rozwiązań, wiele powszechnie stosowanych urządzeń AGD nadal charakteryzuje się efektywnością energetyczną, która odbiega od optymalnej. Problem ten jest złożony i dotyczy różnorodnych typów urządzeń oraz zachodzących w nich procesów. Jak wskazują artykuły przeglądowe analizujące źródła strat energii w AGD, straty energii występują na wielu etapach. Obejmują one nieefektywną konwersję energii elektrycznej na pracę mechaniczną (jak w silnikach czy pompach), straty ciepła do otoczenia w trakcie procesów grzania (wody w pralkach i zmywarkach,

powietrza w suszarkach, komór w piekarnikach), a także bezpowrotną utratę energii podczas odprowadzania gorących mediów (wody, powietrza) lub ciepła generowanego przez pracujące komponenty (silniki, układy elektroniczne). Badania potwierdzają, że istnieje znaczny potencjał oszczędności energii w kluczowych produktach gospodarstwa domowego, co sugeruje, że obecne technologie wciąż mają pole do udoskonaleń [9].

Istniejące mechanizmy poprawy efektywności, takie jak udoskonalona izolacja termiczna, optymalizacja cykli pracy czy wykorzystanie bardziej energooszczędnych komponentów (np. oświetlenie LED, silniki BLDC – Brushless DC motor), choć niewątpliwie istotne, często nie rozwiązują w pełni problemu nieefektywnego zarządzania energią ciepłą wewnątrz urządzenia [10]. Ciepło, będące nierzadko produktem ubocznym pracy jednych komponentów lub medium odpadowym po zakończeniu danego procesu, rzadko jest efektywnie odzyskiwane lub ponownie wykorzystywane. Jak sugerują analizy standardowych rozwiązań termicznych, obecne podejścia mogą kłaść większy nacisk na koszty produkcji i niezawodność niż na maksymalizację odzysku czy transferu ciepła [11]. Skuteczne zarządzanie energią ciepłą jest kluczowe dla poprawy efektywności energetycznej i trwałości urządzeń elektronicznych, a podobne zasady można odnieść do urządzeń AGD [12]. Problem badawczy niniejszej rozprawy koncentruje się na zidentyfikowaniu i przezwyciężeniu tych ograniczeń poprzez opracowanie i ocenę innowacyjnych metod zarządzania energią ciepłą oraz zaawansowanych systemów wymiany ciepła, które mogą być zastosowane w szerokiej gamie urządzeń AGD w celu znaczącej poprawy ich efektywności energetycznej i ogólnej sprawności.

1.2. Geneza problemu

Rosnąca świadomość ekologiczna oraz zaostrzenie norm energetycznych stawiają przed producentami AGD konieczność wdrażania nowych technologii, które umożliwią efektywną rekuperację energii cieplnej. Wymienniki ciepła jako narzędzia pozwalające na odzysk ciepła z procesów odpływowych, stają się jednym z najważniejszych elementów technologicznych, umożliwiających obniżenie zużycia energii oraz emisji CO₂. W literaturze przedmiotu podkreśla się, że mimo istniejących rozwiązań, nadal istnieje potencjał do dalszych usprawnień – na przykład poprzez udoskonalenie geometrii układów wymiany ciepła, integrację systemów odzysku ciepła z elementami napędowymi oraz wykorzystanie nowoczesnych materiałów, w celu zwiększenia przewodności cieplnej i

odporności na korozję. Aktualność podjętego problemu badawczego wynika zarówno z ewolucji technologicznej urządzeń AGD, jak i ze zmieniającego się otoczenia rynkowego i regulacyjnego.

1.2.1. Rynek i standardowe rozwiązania w urządzeniach AGD

Rynek AGD charakteryzuje się szerokim spektrum produktów, obejmującym chłodziarki i zamrażarki, pralki, zmywarki, suszarki, piekarniki, płyty grzewcze oraz drobne urządzenia kuchenne. W każdym z tych segmentów dominują określone standardowe rozwiązania technologiczne. W dziedzinie chłodnictwa powszechne są obiegi sprężarkowe z konwencjonalnymi wymiennikami ciepła, jak skraplacze i parowniki [13]. Urządzenia piorące i zmywające zazwyczaj wykorzystują systemy podgrzewania wody oparte na grzałkach oporowych oraz pompy obiegowe [14,15]. W suszarkach stosuje się technologie kondensacyjne lub coraz częściej, bardziej efektywne pompy ciepła [16]. Urządzenia grzewcze, takie jak piekarniki, wykorzystują grzałki elektryczne lub palniki gazowe [17] (Tabela 2).

Publikacje techniczne szczegółowo opisują te standardowe technologie. Wspólnym elementem wielu urządzeń są silniki elektryczne, coraz częściej silniki BLDC, pompy, wentylatory oraz układy sterowania [19]. W obszarze zarządzania ciepłem, standardowe rozwiązania często ograniczają się do podstawowej izolacji termicznej i prostych wymienników ciepła, projektowanych głównie z uwzględnieniem kosztów produkcji i niezawodności, a niekoniecznie maksymalnej efektywności odzysku czy transferu ciepła.

Regulacyjnie, producenci urządzeń AGD muszą sprostać coraz bardziej rygorystycznym normom. Kluczowe przepisy, takie jak Dyrektywa Ekoprojektu 2009/125/WE [20] oraz Rozporządzenie (UE) 2019/2022 [21], określają limity zużycia energii i wody oraz wymagania dotyczące trwałości produktów. Dodatkowo, wprowadzenie systemu etykietowania energetycznego zgodnie z Rozporządzeniem (UE) 2017/1369 [22] oraz jego rozszerzeniem Rozporządzenia delegowanego (UE) 2019/2017 [23] wymusza na producentach wdrażanie zaawansowanych technologii odzysku energii, aby osiągnąć wyższe klasy efektywności.

Tabela 2. Standardowe technologie i wyzwania związane z efektywnością energetyczną w głównych grupach urządzeń gospodarstwa domowego.

Typ urządzenia	Opis standardowej technologii	Kluczowe wyzwanie związane z efektywnością energetyczną
Chłodziarki	Obieg sprężarkowy z konwencjonalnymi wymiennikami ciepła (skraplacz, parownik)	Straty ciepła przez izolację i uszczelki, efektywność sprężarki i wymienników ciepła
Pralki	Podgrzewanie wody za pomocą grzałek oporowych, mechaniczne działanie bębna	Wysokie zużycie energii na podgrzewanie wody, straty ciepła podczas cyklu prania
Zmywarki	Podgrzewanie wody za pomocą grzałek oporowych, cyrkulacja wody pod ciśnieniem	Wysokie zużycie energii na podgrzewanie wody, straty ciepła podczas cyklu mycia i suszenia
Suszarki	Kondensacyjne lub z pompą ciepła	Wysokie zużycie energii w suszarkach kondensacyjnych, długi czas suszenia w niektórych modelach z pompą ciepła
Piekarniki	Grzałki elektryczne lub palniki gazowe	Straty ciepła przez izolację komory, efektywność konwersji energii na ciepło

System etykietowania energetycznego, obowiązujący obecnie w UE od marca 2021 roku dla zmywarek i innych urządzeń zostały zmienione, powracając z skali A+++ do D do prostszej skali od A do G. Stanowi to istotny, choć niejedyny, wskaźnik efektywności dla konsumentów oraz motywację dla producentów [24]. Analizy wpływu etykiet energetycznych na rynek AGD w Europie potwierdzają ich znaczącą rolę w kształtowaniu wyborów konsumentów i stymulowaniu rynku w kierunku bardziej energooszczędnych produktów [25].

Analiza tych aspektów ujawnia, że mimo stosowania dostępnych technologii, obecny stan techniki nie wykorzystuje pełnego potencjału odzysku energii cieplnej. Istnieje

wyraźna luka badawcza dotycząca usprawnienia przepływu cieplnego, integracji systemów odzysku energii z kluczowymi elementami konstrukcyjnymi oraz doboru materiałów, co stanowi główną motywację dla przeprowadzenia niniejszych badań.

1. Ocena efektywności energetycznej stosowanych rozwiązań.

Na podstawie danych dostępnych u producentów urządzeń AGD oraz analiz rynkowych można stwierdzić, że technologie odzysku ciepła znacząco różnią się pod względem efektywności. Dane przedstawia Tabela 3.

2. Wady i ograniczenia stosowanych systemów.

Mimo zalet, obecnie stosowane rozwiązania wymienników ciepła w AGD mają pewne ograniczenia:

- Ograniczona przestrzeń wewnątrz urządzeń utrudnia zastosowanie bardziej rozbudowanych systemów wymiany ciepła.
- Wysokie koszty wdrożenia technologii odzysku ciepła sprawiają, że nie są one standardem we wszystkich modelach.
- Problemy z konserwacją – wymienniki ciepła w zmywarkach mogą ulegać zanieczyszczeniom, co obniża ich efektywność.

Tabela 3. Efektywność energetyczna różnych systemów wymiany ciepła w urządzeniach AGD

Urządzenie	Typ wymiennika ciepła	Oszczędność energii	Przykładowe modele	Źródło
Zmywarki domowe	Powietrzny wymiennik ciepła	~ 15-90% (w zależności od technologii)	Bosch EcoSilence Drive, Miele ThermoSave	[26-28] [29-31]
Zmywarki przemysłowe	Przeciwprądowy wymiennik ciepła	~ 10-50% (w zależności od systemu)	Winterhalter PT, Hobart Profi FX	[32,33] [34,35]
Suszarki bębnowe	Pompa ciepła	~ 28-50%	Bosch Serie 8, Siemens iQ700	[36,37] [38]
Lodówki	Wymiennik ciepła w układzie sprężarkowym	~ 9-40% (w zależności od technologii)	Samsung NoFrost, Liebherr BioFresh	[39,40] [41]

1.2.2. Problemy obecnych rozwiązań i zmiany prawne

Standardowe technologie stosowane w AGD napotykają na szereg ograniczeń, które negatywnie wpływają na ich efektywność energetyczną. Do głównych problemów należą:

- **Straty ciepła odpadowego:** Znaczna ilość energii jest bezpowrotnie tracona w postaci ciepła odprowadzanego wraz z gorącą wodą (pralki, zmywarki), wilgotnym powietrzem (suszarki) lub ciepłem generowanym przez pracujące komponenty, takie jak silniki, sprężarki czy układy zasilania elektronicznego, które często nie jest efektywnie rozpraszane lub odzyskiwane. Badania kwantyfikujące straty ciepła w różnych procesach AGD wskazują na znaczący potencjał oszczędności energii poprzez odzyskiwanie tego ciepła [42]. Na przykład, w suszarkach konwencjonalnych znaczna ilość ciepła jest tracona wraz z odprowadzaniem powietrzem [43], podczas gdy suszarki z pompą ciepła wykorzystują obieg zamknięty, co znacząco redukuje straty energii.
- **Nieefektywna wymiana ciepła:** Konwencjonalne wymienniki ciepła, takie jak skraplacze i parowniki, mogą wykazywać ograniczoną wydajność z powodu kompromisów projektowych (rozmiar vs. koszt) lub warunków pracy, na przykład oszraniania [44]. Badania nad udoskonaleniem wymiany ciepła w urządzeniach AGD, w tym zastosowanie systemów z pompami ciepła w zmywarkach [45, Tabela 4], wskazują na możliwości znacznego zwiększenia efektywności energetycznej.
- **Niska sprawność konwersji energii:** pomimo ciągłego postępu technologicznego, wciąż występują straty energii podczas konwersji energii elektrycznej na pracę mechaniczną lub ciepło. Chłodzenie kluczowych komponentów, takich jak silniki, może przyczynić się do poprawy ich sprawności i trwałości. Badania nad systemami chłodzenia silników elektrycznych podkreślają ich znaczenie dla optymalizacji pracy urządzeń AGD [50].

Rosnące wymagania prawne sprawiają, że techniczne ograniczenia nabierają większego znaczenia. Unijne regulacje dotyczące ekoprojektu, obecnie ujęte w Rozporządzeniu o ekoprojekcie dla Zrównoważonych Produktów (ESPR) [51], oraz akty wykonawcze dla konkretnych grup wyrobów wprowadzają coraz surowsze minimalne normy dotyczące efektywności energetycznej, zużycia wody, poziomu hałasu oraz kryteriów trwałości i możliwości naprawy (tzw. „prawo do naprawy”). Przykładowo, przepisy dla pralek

i zmywarek określają szczegółowe limity zużycia energii i wody oraz wymogi dotyczące dostępności części zamiennych. W połączeniu z rosnącą świadomością ekologiczną konsumentów i zobowiązaniami klimatycznymi państw, presja legislacyjna silnie motywuje przemysł AGD do wprowadzania nowych rozwiązań technologicznych.

Tabela 4. Skwantyfikowane straty ciepła i potencjał oszczędności energii w urządzeniach gospodarstwa domowego (na podstawie badań)

Typ urządzenia	Proces/Komponent	Skwantyfikowana strata/oszczędność
Lodówka	Straty ciepła przez uszczelkę	Do 21% całkowitego obciążenia termicznego [46]
Pralka	Potencjał oszczędności energii poprzez zachowanie użytkownika	38787,54 GWh rocznie (potencjał krajowy) [42]
Zmywarka	Redukcja zużycia energii dzięki pompie ciepła	24% redukcji całkowitego zużycia energii elektrycznej [47]
Piekarnik	Straty ciepła przez ściany	Prawie połowa zużytego paliwa [48]
Suszarka	Potencjał oszczędności energii dzięki pompie ciepła	Około 30% mniej zużycia energii w porównaniu do konwencjonalnych suszarek [49]

1.2.3. Obiekt badań – metody zarządzania energią cieplną i wymiany ciepła

Zwiększenie wydajności energetycznej sprzętów gospodarstwa domowego wymaga udoskonalenia zjawisk termicznych zachodzących w ich wnętrzu — zarówno redukcji ucieczek ciepła, jak i poprawy skuteczności jego transferu. Kierunki badawcze

obejmujące zaawansowane systemy odzysku ciepła w zmywarkach oraz integrację ciepłowodów w konstrukcji wymienników mają duży potencjał w zakresie obniżenia zużycia energii i podniesienia ogólnej sprawności urządzeń. Wymienniki ciepła są tu elementem fundamentalnym — pozwalają na przekaz energii między dwoma mediami bez mieszania ich zawartości; zjawisko to jest modelowane m.in. przez prawo przewodzenia ciepła opisane równaniem *Fouriera*:

$$\dot{Q} = \frac{\lambda A}{d} \Delta T \text{ [W]} \quad (1)$$

gdzie $\dot{Q}$ to strumień ciepła [W], λ - współczynnik przewodnictwa cieplnego [W/(m·K)], A - powierzchnia przekroju przewodzenia [m²], ΔT - różnica temperatur [K], d - grubość ścianki [m].

W niniejszej pracy poddano analizie trzy innowacyjne koncepcje wymienników ciepła, które mają na celu zwiększenie efektywności energetycznej zmywarek poprzez maksymalizację odzysku ciepła:

1. **Przeciwprądowy wymiennik ciepła** – w tym rozwiązaniu dwa strumienie cieczy, tj. gorąca woda odpływowa oraz zimna woda zasilająca, przepływają w przeciwnych kierunkach. Taka konfiguracja utrzymuje wysoki gradient temperatur na całej długości wymiennika, co skutkuje intensywnym transferem ciepła. Efektywność tego układu można opisać równaniem bilansu cieplnego:

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T_{lm} \text{ [W]} \quad (2)$$

gdzie U oznacza całkowity współczynnik przenikania ciepła [W/(m²·K)], który uwzględnia opory przenikania ciepła zarówno przez materiał (przewodzenie), jak i przez warstwy płynów (konwekcja) oraz ewentualne inne opory, ΔT_{lm} to logarytmiczna średnia różnica temperatur [K] [52].

2. **Wymiennik ciepła w silniku BLDC** – koncepcja przewiduje integrację wymiennika ciepła z układem napędowym (silnikiem) w roli odbiornika ciepła — czyli jako elementu chłodzącego stojan silnika BLDC. Ciepło generowane przez silnik jest odprowadzane do medium, co zmniejsza temperaturę pracy napędu, redukuje przeciążenie termiczne i poprawia jego trwałość oraz niezawodność. Przepływ energii cieplnej w takim układzie opisuje się równaniem podobnym do wcześniej

przedstawionego (2), z wyraźnym uwzględnieniem interfejsu termicznego między elementami mechanicznymi a medium chłodzącym jako dodatkowego składnika oporu cieplnego [53].

3. **Modułowy wymiennik ciepła** – pomysł ten opiera się na możliwości doboru wielkości wymiennika do aplikacji. Konstrukcja modułowa pozwala na łatwą adaptację wymiennika do ograniczonej przestrzeni montażowej, przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej przewodności cieplnej i odporności na korozję dzięki zastosowaniu odpowiednich materiałów.

Kluczowym aspektem jest dobór materiałów o wysokiej przewodności i odporności na korozję, takich jak aluminium anodowane lub specjalne stopy miedzi.

Szczegółowe opisy konstrukcyjne oraz zasady działania poszczególnych koncepcji zostaną przedstawione w Rozdziale 4, natomiast ich efektywność zostanie oceniona w badaniach numerycznych (CFD - Computational Fluid Dynamics) (Rozdział 5.1) i laboratoryjnych (Rozdział 5.2).

Analiza wprowadzenia do zagadnienia efektywności energetycznej w sprzęcie AGD uwidacznia złożoność problematyki oraz kluczowe znaczenie prowadzonych badań. Globalne dążenie do zrównoważonego rozwoju i przeciwdziałania zmianom klimatycznym stawia przed sektorem AGD imperatyw ciągłego doskonalenia. Pomimo istniejących postępów technologicznych, wiele standardowych rozwiązań nadal wykazuje rezerwy w zakresie efektywności energetycznej, co prowadzi do znaczących strat energii na różnych etapach ich pracy.

Rosnąca świadomość ekologiczna konsumentów oraz zaostrzające się regulacje prawne, szczególnie w Unii Europejskiej, tworzą silną presję na producentów w kierunku innowacji i wdrażania bardziej efektywnych rozwiązań. Optymalizacja procesów cieplnych, zarówno poprzez minimalizację strat ciepła, jak i maksymalizację jego transferu, jawi się jako kluczowy obszar do dalszych badań i rozwoju. Zaawansowane metody zarządzania energią cieplną i systemy wymiany ciepła mają potencjał, aby znacząco przyczynić się do poprawy efektywności energetycznej i ogólnej sprawności urządzeń AGD, co będzie miało pozytywny wpływ zarówno na środowisko, jak i na ekonomię gospodarstw domowych.

1.3. Cel rozprawy

Celem niniejszej rozprawy doktorskiej jest opracowanie metody i usprawnienie konstrukcji wymienników ciepła w zmywarkach, które pozwolą na znaczne zwiększenie efektywności energetycznej i jednocześnie zmniejszenie zużycia wody. Dążenie do redukcji zużycia energii w urządzeniach AGD wynika z rosnących wymagań prawnych, jak i oczekiwań użytkowników związanych z obniżeniem kosztów eksploatacji oraz mniejszym wpływem na środowisko naturalne.

Realizacja celu głównego wymaga:

1. Opracowania innowacyjnych rozwiązań konstrukcyjnych wymienników ciepła:
 - przeciwbieżny wymiennika ciepła, który umożliwia wykorzystanie ciepła odpadowego z gorącej wody odpływowej. Takie rozwiązanie powinno pozwolić na wstępne podgrzewanie zimnej wody napływającej, co może prowadzić do zmniejszenia zapotrzebowania na energię w kolejnych cyklach zmywania.
 - wymiennika ciepła zintegrowanego ze statorem silnika BLDC, którego główną funkcją jest chłodzenie silnika. Rozwiązanie to wspiera zwiększenie sprawności energetycznej urządzenia oraz wydłużenie żywotności silnika.
 - Modułowy wymiennik ciepła, zaprojektowany z myślą o złożonych układach i ograniczonej przestrzeni, pozwala na elastyczne modyfikowanie rozmiarów wymiennika, dzięki czemu można go łatwo zaadaptować do specyficznych wymagań każdego urządzenia
2. Analizy doboru materiałów o wysokiej przewodności cieplnej, odporności na korozję i wytrzymałości w trudnych warunkach środowiskowych wewnątrz zmywarki. Wybór odpowiednich materiałów dla wymienników ciepła jest kluczowy dla zapewnienia trwałości i niezawodności konstrukcji w długotrwałym użytkowaniu.
3. Modelowania i symulacji termodynamicznych oraz CFD, które pozwolą na dokładne odwzorowanie przepływu ciepła i masy w zaprojektowanych układach wymienników ciepła. Celem jest ocena efektywności proponowanych rozwiązań oraz ich potencjalnych korzyści w kontekście zużycia energii.
4. Przeprowadzenia badań laboratoryjnych, które umożliwią walidację wyników symulacji i dostarczą danych do porównania efektywności opracowanych rozwiązań z tradycyjnymi układami wymiany ciepła stosowanymi w zmywarkach.

Cel ten jest zgodny z dążeniem do zaprojektowania bardziej ekologicznych urządzeń AGD, które nie tylko spełniają wymagania użytkowników, ale także przyczyniają się do zmniejszenia ich śladu węglowego. Wyniki badań mogą stanowić podstawę dla dalszych innowacji technologicznych w branży AGD oraz dostarczyć wiedzy niezbędnej do projektowania zmywarek zgodnych z przyszłymi wymaganiami regulacyjnymi.

1.4. Teza rozprawy

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

Zastosowaniu 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.

Uzasadnienie tezy:

1. Gradient termiczny:

- Przeciwprądowy wymiennik na ścianie komory mycia maksymalizuje różnicę temperatur pomiędzy wodą gorącą a zimną, zwiększając sprawność termiczną procesu mycia (H1).

2. Odzysk ciepła z silnika:

- Integracja z silnikiem BLDC umożliwia jednoczesne chłodzenie stojana i przekierowanie ciepła odpadowego do wstępnego podgrzewania wody (H2).

3. Modułowość i skalowalność:

- Budowa modułowa pozwala łatwo adaptować system do różnych modeli AGD, bez konieczności gruntownych modyfikacji konstrukcji (H3).

4. Trwałe materiały:

- Stosowanie stopów o wysokiej przewodności cieplnej i odporności na korozję (np. stopy miedzi lub aluminium z odpowiednimi powłokami) wydłuża czas bezawaryjnej eksploatacji w porównaniu z konwencjonalnymi rozwiązaniami (H4).

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.

Metody weryfikacji:

- Badania symulacyjne: analiza efektywności cieplnej i mechanicznej poszczególnych układów.
- Testy prototypowe w warunkach laboratoryjnych: pomiary zużycia energii, strat cieplnych oraz ocena trwałości materiałowej.

1.5. Zakres rozprawy

Niniejsza rozprawa obejmuje kompleksowe badania nad poprawą efektywności energetycznej zmywarek poprzez opracowanie i ocenę trzech innowacyjnych układów odzysku ciepła. Badania mają charakter interdyscyplinarny, łączący aspekty inżynierii materiałowej, mechaniki płynów, termodynamiki oraz konstrukcji urządzeń AGD. W pracy położono nacisk zarówno na analizę teoretyczną, jak i na praktyczną weryfikację proponowanych rozwiązań. Obejmują one: szczegółowy przegląd literatury, dobór materiałów o optymalnych właściwościach cieplnych i chemicznych, projekt koncepcyjny i szczegółową analizę wymienników przeciwprądowych, zintegrowanych z silnikiem BLDC oraz modułowych, a także kompleksowe 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 rozprawie pojęcie *sprawności* odnosi się do wielkości technicznych, definiowanych wzorami (np. sprawność kotłów, pomp, silników), natomiast *efektywność energetyczna* rozumiana jest szerzej – jako ocena całościowa systemu (budynku, procesu czy instalacji), uwzględniająca nie tylko parametry techniczne, ale też projekt, użytkowanie, kontekst klimatyczny i instalacyjne rozwiązania, zgodnie z użyciem tego terminu w aktach prawnych UE [54].

Zakres poszczególnych rozdziałów przedstawia się następująco:

- **Rozdział 1** (Wstęp. Wprowadzenie do problematyki badań): określenie problemu badawczego, genezy i uwarunkowań prawnych, przedstawienie przedmiotu badań, celów, tezy oraz zakresu pracy, a także wskazanie motywacji podjęcia badań i oczekiwanych rezultatów praktycznych.
- **Rozdział 2** (Przegląd literatury i stanu wiedzy): synteza aktualnego stanu wiedzy z zakresu energooszczędności i technologii wymienników ciepła w AGD, omówienie dostępnych rozwiązań przemysłowych oraz identyfikacja luk technologicznych uzasadniających potrzebę podjęcia badań własnych.
- **Rozdział 3** (Dobór materiałów do wymienników ciepła): kryteria selekcji stopów metali i kompozytów ze względu na przewodność cieplną, odporność na korozję, zgodność chemiczną z detergentami oraz wyniki badań laboratoryjnych potwierdzających właściwości mechaniczne i eksploatacyjne wybranych materiałów.
- **Rozdział 4** (Opracowanie innowacyjnych rozwiązań w urządzeniach AGD): opis i analiza trzech autorskich rozwiązań – przeciwprądowego wymiennika na bocznej ścianie zmywarki, wymiennika wokół stojanu silnika BLDC oraz modułowego układu odzysku ciepła, wraz z omówieniem założeń konstrukcyjnych, sposobu działania oraz potencjalnych zalet i ograniczeń poszczególnych wariantów.
- **Rozdział 5** (Metodyka): szczegółowe przedstawienie założeń i narzędzi symulacji CFD, w tym doboru modeli turbulencji, metod siatkowania i schematów numerycznych, a także opis konfiguracji stanowiska badawczego, procedur testów laboratoryjnych oraz metod rejestracji i analizy danych pomiarowych.
- **Rozdział 6** (Wyniki badań numerycznych i laboratoryjnych): prezentacja wyników badań symulacyjnych oraz laboratoryjnych dla każdego z badanych układów, porównanie efektywności odzysku ciepła oraz walidacja modeli obliczeniowych na podstawie danych laboratoryjnych.

- **Rozdział 7** (Analiza wyników i ocena efektywności): krytyczne porównanie opracowanych rozwiązań z istniejącymi technologiami rynkowymi, ocena potencjału oszczędności energetycznych i kosztów operacyjnych, identyfikacja barier technologicznych oraz ocena długofalowej niezawodności zaproponowanych konstrukcji.
- **Rozdział 8** (Wnioski i rekomendacje): zestawienie kluczowych rezultatów, ocena realizacji celów badawczych i skuteczności zaproponowanych rozwiązań. Przedstawiono praktyczne rekomendacje dla przemysłu AGD, wskazano potencjalne kierunki dalszych badań oraz możliwości rozszerzenia analiz na inne urządzenia gospodarstwa domowego, takie jak pralki czy suszarki.

2. Przegląd literatury i stanu wiedzy

Rozwój energooszczędnych rozwiązań technologicznych w urządzeniach gospodarstwa domowego stanowi istotny kierunek współczesnych badań, zarówno naukowych, jak i przemysłowych. W szczególności, ze względu na zaostrzenie norm prawnych dotyczących zużycia energii oraz rosnące zainteresowanie konsumentów ekologicznymi rozwiązaniami, producenci zmywarek oraz innych urządzeń AGD stoją przed wyzwaniem opracowania nowych konstrukcji, które maksymalizują wydajność energetyczną przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej funkcjonalności i trwałości. Wymienniki ciepła jako komponenty umożliwiające odzysk energii, odgrywają kluczową rolę w dążeniu do poprawy efektywności energetycznej tych urządzeń.

Przegląd literatury i stanu wiedzy pozwala na zrozumienie dotychczasowych osiągnięć w tej dziedzinie, identyfikację istniejących luk badawczych oraz ocenę potencjalnych rozwiązań, które mogą zostać wdrożone w przyszłości. Analiza dostępnych badań naukowych oraz przegląd patentów i standardowych rozwiązań rynkowych umożliwia krytyczne spojrzenie na aktualne trendy oraz technologie stosowane w wymiennikach ciepła w zmywarkach i innych urządzeniach AGD.

W niniejszym rozdziale, przedstawiono literaturę dotyczącą energooszczędności oraz wydajności w urządzeniach AGD. Omówiono różne technologie wymienników ciepła stosowane w zmywarkach, a także parametry i materiały, które wpływają na ich efektywność. Poruszono również koncepcje konstrukcyjne wymienników ciepła oraz ich wpływ na wydajność energetyczną. Przegląd ten dostarczył podstawy teoretyczne, niezbędne do zrozumienia dalszych części rozprawy oraz umożliwiło ocenę zasadności i potencjału wprowadzanych innowacji w kontekście aktualnych wyzwań związanych z energooszczędnością i ochroną środowiska.

Przegląd literatury został podzielony na kilka kluczowych obszarów:

- 1. Energooszczędność i efektywność w urządzeniach AGD** – w tej części omówiono koncepcje energooszczędności, statystyki zużycia energii przez zmywarki oraz regulacje prawne nakładające limity na poziom zużycia energii przez urządzenia AGD.
- 2. Przegląd technologii wymienników ciepła w zmywarkach** – analiza istniejących technologii wymienników ciepła, w tym wymienników przeciwprądowych, przepływowych oraz rozwiązań zintegrowanych z elementami konstrukcyjnymi zmywarek.

3. **Parametry wpływające na wydajność wymienników ciepła** – identyfikacja i omówienie parametrów, takich jak powierzchnia wymiany ciepła, przepływ cieczy, różnica temperatur, które mają bezpośredni wpływ na efektywność energetyczną wymienników ciepła.
4. **Koncepcje konstrukcyjne wymienników ciepła i ich wpływ na efektywność** – opis różnych rozwiązań konstrukcyjnych, takich jak wymienniki spiralne, przeciwbieżne i modułowe, oraz ich zalet i wad w kontekście odzyskiwania ciepła w zmywarkach.
5. **Analiza materiałowa wymienników ciepła** – ocena materiałów stosowanych w wymiennikach ciepła, z uwzględnieniem ich przewodności cieplnej, odporności na korozję oraz wytrzymałości w warunkach panujących w zmywarkach.

Każdy z tych punktów został omówiony szczegółowo, aby dostarczyć kompleksowego obrazu aktualnego stanu wiedzy oraz zidentyfikować obszary wymagające dalszych badań.

2.1. Energooszczędność i efektywność w urządzeniach AGD

Wiele powszechnie stosowanych urządzeń AGD wciąż cechuje się efektywnością energetyczną, która odbiega od optymalnej. Problem ten jest złożony i obejmuje różnorodne typy urządzeń oraz zachodzące w nich procesy. Kluczowym zagadnieniem jest znaczna ilość energii, która jest bezpowrotnie tracona w postaci ciepła odpadowego. W pralkach i zmywarkach straty te obejmują ciepło odprowadzane wraz z gorącą wodą, podczas gdy w suszarkach wilgotne powietrze jest wyrzucane do otoczenia. Ciepło jest również produktem ubocznym pracy komponentów, takich jak silniki, sprężarki czy układy elektroniczne, które często nie jest efektywnie odzyskiwane lub ponownie wykorzystywane.

Tradycyjne rozwiązania inżynierskie często traktują ciepło odpadowe jako nieunikniony produkt uboczny, który należy jedynie skutecznie rozproszyć. Ten paradygmat prowadzi do projektowania systemów opartych na izolacji termicznej i prostych wymiennikach ciepła, które są projektowane głównie z uwzględnieniem kosztów produkcji i niezawodności, a niekoniecznie maksymalnej efektywności odzysku czy transferu ciepła. Taki stan rzeczy prowadzi do wyraźnej luki badawczej, którą adresuje niniejsza praca:

brakuje kompleksowych rozwiązań, które traktowałyby ciepło odpadowe jako wartościowy zasób do rekuperacji. Zamiast pasywnej dyssypacji energii, innowacyjne podejścia, takie jak te opisane w rozprawie, proponują celowe i aktywne odzyskiwanie ciepła i włączanie go z powrotem do cyklu energetycznego urządzenia.

Ten fundamentalny zwrot w podejściu do zarządzania energią cieplną ma potencjał do znaczącej poprawy sprawności urządzeń. Zmniejszenie strat ciepła nie tylko obniża zużycie energii elektrycznej przez grzałki, ale również może skracać czas trwania cykli, co dodatkowo przekłada się na korzyści finansowe dla konsumentów i mniejszy ślad węglowy. W związku z tym, skuteczne zarządzanie energią cieplną jest postrzegane jako kluczowy element transformacji energetycznej w sektorze AGD, oferujący znaczący potencjał oszczędności i jednocześnie wspierający cele zrównoważonego rozwoju.

Pomimo postępu technologicznego i rosnącej efektywności urządzeń AGD, realne oszczędności energii i wody często odbiegają od wartości deklarowanych na etykietach energetycznych. Jednym z głównych powodów tej dysproporcji są nawyki i zachowania konsumentów, które, choć pozornie nieistotne, w praktyce niweczą potencjał energooszczędności. [54]

Kluczowym przykładem jest praktyka wstępnego płukania naczyń pod bieżącą wodą przed włożeniem ich do zmywarki. Badania przeprowadzone w USA wykazały, że 55% użytkowników nadal stosuje tę metodę [55]. W Europie, dane są równie niepokojące: w niektórych regionach, jak we Włoszech, odsetek ten wynosi nawet 42%, podczas gdy w Niemczech zaledwie 4% [54]. Ta niezalecana praktyka, sprzeczna z instrukcjami producentów i detergentów, marnuje znaczne ilości wody (do 20 litrów na cykl) oraz energię potrzebną do jej podgrzania [55].

Dodatkowo, preferencje konsumentów odnośnie wyboru programów mycia mają bezpośredni wpływ na zużycie energii. Badania wykazały, że zaledwie 25% użytkowników regularnie wybiera programy „Eco”, które są najbardziej energooszczędne, natomiast 48% preferuje programy „Normal” lub „Auto”, które zużywają znacznie więcej energii, często osiągając temperatury mycia powyżej 65 °C. To zjawisko wynika często z braku zaufania do programów o niższej temperaturze lub dłuższym czasie trwania, a także z obawy przed niedomytymi naczyniami [54].

Tabela 5. Porównanie zużycia wody i energii: mycie ręczne vs. zmywarka [56].

Scenariusz	Woda (l)	Energia (kWh)
Mycie ręczne	140	2,6
Zmywarka (bez wstępnego płukania)	12	0,9
Zmywarka (z wstępnym płukaniem)	> 32	> 0,9

Jak widać w Tabeli 5, mycie ręczne zużywa znacznie więcej zasobów niż zmywarka. Jednakże, nieodpowiednie nawyki, takie jak wstępne płukanie, mogą podważać te oszczędności. Rozbieżność między technicznym potencjałem oszczędności a realnymi wynikami użytkowania pokazuje, że innowacje technologiczne muszą iść w parze z edukacją konsumentów. Z jednej strony, producenci muszą tworzyć bardziej skuteczne programy energooszczędne, które poradzą sobie z trudniejszymi zabrudzeniami, a z drugiej, muszą edukować użytkowników, że nie ma potrzeby wstępnego płukania naczyń. Tylko wtedy możliwe będzie pełne wykorzystanie potencjału energooszczędnych urządzeń i osiągnięcie celów zrównoważonego rozwoju.

W praktyce technicznej i w analizach rynkowych obserwuje się znaczne rozrzuty parametrów eksploatacyjnych pomiędzy modelami i programami. Dla zmywarek typowy pobór mocy podczas cyklu wynosi zwykle 1,2–2,4 kW, zużycie energii na cykl mieści się w przedziale ok. 0,65–1,55 kWh, a roczne zużycie energii może wahać się od około 84 kWh do ponad 260 kWh w zależności od modelu i sposobu użytkowania (Tabela 6) [57]. Modele spełniające kryteria programów certyfikacyjnych charakteryzują się niższym zużyciem energii i wody, co podkreśla skuteczność instrumentów regulacyjnych i etykietowania w napędzaniu postępu technologicznego [54, 57].

W przeglądzie literatury jako centralne źródła strat energetycznych w urządzeniach AGD wymienia się:

- ciągłą pracę urządzeń chłodniczych (lodówki, zamrażarki),
- potrzeby podgrzewania wody (pralki, zmywarki),
- procesy suszenia (suszarki),
- cykliczne straty ciepła i energii w urządzeniach grzewczych (piekarniki).

Tabela 6. Przykładowe wartości zużycia energii i wody w zmywarkach domowych.

Parametr	Zakres typowy / wartości średnie	Uwagi źródłowe
Pobór mocy chwilowy	1,2-2,4 kW	Zależy od fazy cyklu [57]
Zużycie energii na cykl	0,65 – 1,55 kWh	Eco: ~ 0,9 kWh; Intensywne: ~ 1,5 kWh [57]
Roczne zużycie energii	84-260 kWh	Zależne od modelu i użytkowania [57]
Modele certyfikowane	< 240 kWh/rok	Kryteria certyfikacji [54, 56]
Zużycie wody na cykl	6 – 12 l	Wysokowydajne modele: ~ 6 – 7 l [54]
Polska – średnie zużycie energii	~ 1,07 kWh/cykl	Dane krajowe i przegląd literatury [56, 58]

W każdej z tych kategorii rozwijane są rozwiązania technologiczne i systemowe mające na celu ograniczenie zużycia energii oraz poprawę efektywności użytkowej.

W zmywarkach rozwój technologiczny obejmuje czujniki zabrudzenia i obciążenia, optymalizację dysz i przepływów, bardziej wydajne pompy oraz systemy suszenia kondensacyjnego i zeolitowego; dodatkowo pojawiają się rozwiązania odzysku ciepła (wymenniki wstępnego podgrzewu napływającej wody, kondensacyjne układy suszenia), które w badaniach empirycznych i symulacyjnych wykazują realny potencjał redukcji zużycia energii [59, 60]. Jednak skuteczność odzysku zależy silnie od geometrii wymiennika, warunków brzegowych i trwałości materiałowej, co wymaga łączenia modelowania CFD z walidacją laboratoryjną [59, 61].

W pralkach kluczowe rozwiązania poprawiające efektywność to silniki inwerterowe o zmiennej prędkości, detekcja obciążenia i zoptymalizowane algorytmy „Eco”, a także prace nad odzyskiem ciepła z odpływów lub integracją z systemami ciepłowniczymi domu. W wyniku wdrożenia regulacji ekoprojektowych pralki współczesne wykazują znacznie niższe zużycie energii i wody niż modele sprzed kilkadziesiąt lat, jednak bariery użytkowe (preferencja krótszych i cieplejszych programów) ograniczają całkowity potencjał oszczędności [62].

Suszarki bębnowe należą do najbardziej energochłonnych urządzeń AGD — średni cykl może wymagać 2–4 kWh. Najbardziej efektywną technologią są suszarki z pompą ciepła, które odzyskują ciepło z wilgotnego powietrza i mogą obniżyć zużycie energii nawet o ok. 50–60% w stosunku do konwencjonalnych suszarek kondensacyjnych [55]. Wdrożenia regulacyjne i etykietowanie sprzyjają upowszechnianiu tych rozwiązań, ale wyższe koszty zakupowe i dłuższe czasy cykli pozostają barierami rynkowymi.

Piekarniki i urządzenia do gotowania charakteryzują się stosunkowo niskim udziałem w całkowitym zużyciu energii gospodarstwa, lecz intensywnym poborem mocy w czasie użytkowania. Poprawa efektywności jest osiągana przez lepszą izolację komory, systemy konwekcyjne redukujące czas pieczenia oraz precyzyjne sterowanie temperaturą; mimo to oczekiwania użytkowników co do szybkości i jakości przygotowania potraw ograniczają możliwość znacznego redukcji zużycia energii kosztem funkcjonalności [62].

Chłodziarki i zamrażarki pracują nieprzerwanie i dlatego ich efektywność ma znaczący udział w zużyciu energii domowej. Dzięki sprężarkom inwerterowym, ulepszonej izolacji (np. panele próżniowe) oraz stosowaniu efektywnych czynników chłodniczych średnie roczne zużycie nowych urządzeń spadło istotnie w ostatnich dekadach [63]. Wdrożenia ekoprojektowe i etykietowanie przyczyniły się do dużych oszczędności energetycznych na poziomie systemowym, choć powszechna obecność starszych, mniej efektywnych urządzeń w gospodarstwach ogranicza natychmiastowy efekt wymiany rynku [54, 64].

W literaturze i raportach branżowych identyfikowane są kluczowe bariery wdrożeniowe dla zaawansowanych technologii energooszczędnych: ograniczona przestrzeń montażowa i integracyjna, wzrost kosztów produkcji, zwiększona złożoność mechaniczna (w tym ryzyko wycieków i potrzeba dodatkowych uszczelnień), potencjalny wzrost oporów hydraulicznych (konieczność mocniejszych pomp) oraz problemy trwałości materiałowej w obecności agresywnych detergentów i osadów [59, 61]. Ponadto brak ujednoliconych protokołów testowych utrudnia bezpośrednie porównania wyników różnych badań i ogranicza ocenę opłacalności technologii w warunkach produkcji masowej [57].

W świetle przejrzenia literatury istnieje wyraźna luka badawcza w zakresie kompleksowego łączenia:

- optymalizacji geometrycznej i materiałowej,
- zaawansowanego modelowania CFD z ustalonymi warunkami brzegowymi,

- długoterminowych testów eksploatacyjnych walidujących trwałość i opłacalność rozwiązań.

Niniejsza rozprawa odnosi się do tych braków poprzez zaprojektowanie i porównanie trzech koncepcji wymienników ciepła dla zmywarek (boczny, zintegrowany ze stojanem BLDC, modułowy), przeprowadzenie szczegółowych badań symulacyjnych oraz walidację laboratoryjną z uwzględnieniem kryteriów materiałowych i wymogów integracji przemysłowej [57, 59].

2.2. Przegląd technologii wymienników ciepła w urządzeniach AGD

Wymienniki ciepła działają na zasadzie wymiany energii cieplnej między dwoma płynami o różnych temperaturach bez ich bezpośredniego mieszania [61]. W zmywarkach, wymienniki ciepła zazwyczaj odzyskują ciepło z odpływającej ciepłej lub gorącej wody po myciu lub płukaniu, a także z pary wodnej generowanej podczas tych cykli, aby wstępnie podgrzać dopływającą zimną wodę. Dzięki temu, energia potrzebna do podgrzania wody przez główny element grzewczy zmywarki do żądanej temperatury mycia ulega znacznemu zmniejszeniu. Wstępne podgrzanie wody przed jej użyciem w cyklu mycia lub płukania bezpośrednio przekłada się na mniejsze zużycie energii elektrycznej, co jest kluczowym elementem poprawy efektywności energetycznej zmywarek.

Zastosowanie wymienników ciepła w zmywarkach może prowadzić do znaczących oszczędności energii. Kompaktowy wymiennik ciepła w zmywarkach podblatowych może zredukować zużycie energii o około 0,1 kWh na każdy cykl zmywania [66]. Wewnętrzne badania producenta wykazały, że zmywarka w programie Eco zużywa 0,73 kWh na cykl, podczas gdy ręczne mycie naczyń o podobnym załadunku wymaga 2,6 kWh do podgrzania wody, co oznacza oszczędność 1,87 kWh na cykl [67]. Odzyskiwanie ciepła z szarej wody za pomocą wymiennika ciepła przymocowanego do zmywarki może przynieść roczne oszczędności energii elektrycznej na poziomie 53,48 kWh i zwiększyć efektywność zmywarki o około 16% [59].

Chociaż główną funkcją wymienników ciepła jest odzyskiwanie energii, optymalizacja procesu podgrzewania wody może pośrednio przyczynić się do oszczędności wody. Efektywniejsze podgrzewanie wody do wymaganej temperatury może skrócić czas trwania niektórych etapów cyklu, potencjalnie zmniejszając całkowite zużycie wody.

Zmywarki wyposażone w wymienniki ciepła często wykorzystują suszenie kondensacyjne. Para wodna, powstająca podczas ostatniego płukania gorącą wodą, skrapla się na chłodniejszych ściankach komory zmywarki, w których zintegrowany jest wymiennik ciepła [60]. Ten proces suszenia jest łagodniejszy dla naczyń, zwłaszcza delikatnych, takich jak szkło i porcelana, ponieważ unika gwałtownych zmian temperatury.

Suszenie kondensacyjne z wykorzystaniem wymiennika ciepła może również przyczynić się do bardziej higienicznych warunków suszenia, ponieważ para wodna jest skraplana i odprowadzana, a nie pozostaje w komorze zmywarki. Niektóre systemy suszenia parowego, choć działają na innej zasadzie, również mogą oferować wysoki poziom higieny poprzez naturalne wyparzenie naczyń [68].

2.3. Parametry wpływające na wydajność wymienników ciepła

Powierzchnia wymiany ciepła jest jednym z kluczowych parametrów decydujących o ilości ciepła, jakie może zostać wymienione między dwoma płynami. Im większa powierzchnia kontaktu między płynami, tym więcej ciepła może zostać przekazane, co bezpośrednio przekłada się na efektywność energetyczną urządzenia. Zwiększenie powierzchni wymiany ciepła w wymienniku pozwala na bardziej efektywne odzyskiwanie energii cieplnej z odpływającej cieczy lub pary. Projektując wymiennik ciepła, inżynierowie muszą uwzględnić ograniczenia przestrzenne urządzenia, starając się jednocześnie zmaksymalizować powierzchnię wymiany ciepła poprzez zastosowanie specjalnych konstrukcji, takich jak cienkie płyty, rurki o małej średnicy lub ożebrowanie [69].

Prędkość przepływu zarówno gorącego, jak i zimnego płynu przez wymiennik ciepła ma istotny wpływ na efektywność wymiany ciepła. Wyższy przepływ może prowadzić do zwiększenia turbulencji, co z kolei poprawia wymianę ciepła, ale jednocześnie może powodować większy spadek ciśnienia i zwiększać zużycie energii przez pompę. Z kolei niższy przepływ wydłuża czas kontaktu między płynami, co może zwiększyć wymianę ciepła, ale tylko do pewnego momentu, poniżej którego efektywność może spaść, jeśli przepływ jest zbyt mały. Kluczowe jest znalezienie optymalnej wartości przepływu, która maksymalizuje wymianę ciepła przy minimalnym zużyciu energii na pompowanie [70,71].

Różnica temperatur między gorącym a zimnym płynem jest siłą napędową procesu wymiany ciepła. Im większa różnica temperatur, tym intensywniejsza wymiana ciepła.

Efektywność wymiennika ciepła jest również zależna od gradientu temperatury wzdłuż jego długości [67]. W analizie i projektowaniu wymienników ciepła często stosuje się pojęcie średniej logarytmicznej różnicy temperatur (LMTD - Logarithmic Mean Temperature Difference) (3), które uwzględnia zmiany temperatury płynów podczas przepływu przez wymiennik [72]:

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} [K] \quad (3)$$

gdzie:

- $\Delta T_1 = T_{h,in} - T_{c,out}$ – różnica temperatur na jednym końcu wymiennika [K],
- $\Delta T_2 = T_{h,out} - T_{c,in}$ – różnica temperatur na drugim końcu wymiennika [K].

Jeśli $\Delta T_1 = \Delta T_2$, wtedy $\Delta T_{lm} = \Delta T_1$

Wyższa wartość ΔT_{lm} wskazuje na większy gradient temperatur i co za tym idzie, bardziej efektywną wymianę ciepła.

Właściwości termofizyczne płynów mają kluczowy wpływ na intensywność wymiany ciepła w wymienniku. Przewodność cieplna (λ) określa zdolność płynu do przewodzenia ciepła – im wyższa wartość λ , tym szybciej energia przekazywana jest z jednej strony wymiennika na drugą. Ciepło właściwe (c_p) decyduje o ilości ciepła potrzebnego do podniesienia temperatury jednostki masy płynu o jeden stopień; płyny o dużym cieple właściwym magazynują więcej energii, co wpływa na zmianę profilu temperaturowego w wymienniku. Lepkość dynamiczna (μ) natomiast determinuje opory przepływu – płyny bardziej lepkie generują większy spadek ciśnienia, co może ograniczać uzyskiwaną prędkość przepływu przy tej samej pracy pompy. Jednocześnie lepkość wpływa na rozwój warstwy przyściennej i charakter przepływu (laminarny vs. turbulentny), a tym samym na współczynnik przenoszenia ciepła. Dlatego w projektowaniu wymiennika należy dobrać czynniki robocze o optymalnym zestawie parametrów termofizycznych, a w razie potrzeby stosować dodatki (np. polimery lub nanocząstki) modyfikujące przewodność czy lepkość płynu [73,74].

Zanieczyszczenia (*fouling*), czyli osadzanie się i narastanie warstw zanieczyszczeń (np. kamienia kotłowego, produktów korozji, biopłytki), prowadzi do wzrostu oporu cieplnego oraz hydraulicznego w wymienniku. Osady działają jak izolator, zmniejszając

efektywną powierzchnię wymiany ciepła i obniżając współczynnik przenikania ciepła. Dodatkowo nagromadzenie zanieczyszczeń powoduje wzrost spadku ciśnienia, co wymaga większą pracę pomp i zwiększa zużycie energii. W analizie ekonomicznej eksploatacji wymienników uwzględnia się koszty okresowego czyszczenia lub wymiany elementów, a także ryzyko trwałego uszkodzenia powierzchni wymiany. Zapobieganie takiemu procesowi (*fouling*) realizuje się poprzez instalację filtra wstępnego, stosowanie inhibitorów korozji i skalowania oraz projektowanie układów umożliwiających łatwy dostęp do czyszczenia mechanicznego lub chemicznego [75].

Tabela 7. Kluczowe parametry wpływające na efektywność wymienników ciepła [76].

Parametr	Opis	Wpływ na wymianę ciepła	Metoda optymalizacji
Współczynnik przenikania ciepła (α / h)	Określa efektywność transferu ciepła między płynem a ścianką	Wyższy $\alpha \Rightarrow$ większy strumień ciepła (q'' i większa $\dot{Q}$ przy danej ΔT)	Zwiększenie turbulencji (skrętki, żebra), optymalizacja geometrii kanałów, poprawa kontaktu powierzchni (redukcja oporu kontaktowego)
Spadek ciśnienia (Δp)	Różnica ciśnienia między wejściem a wyjściem płynu w wymienniku	Wyższy $\Delta p \Rightarrow$ większe zużycie mocy pompy, ale także potencjalnie większa turbulencja $\Rightarrow$ wyższe h , ale kosztem większego poboru mocy	Optymalizacja geometrii kanałów, dobrane pompy o odpowiedniej charakterystyce, kompromis między Δp a h (projektowy)
Powierzchnia wymiany ciepła (A)	Całkowita (efektywna/zwilżona) powierzchnia kontaktu między strumieniami/płynami	Większa $A \Rightarrow$ większa całkowita moc wymiennika $\dot{Q} = q'' \cdot A$	Zastosowanie mikrokanalików, cienkich płyt, ożebrowania, powiększenie A_{eff} przy zachowaniu dopuszczalnego Δp

Parametr	Opis	Wpływ na wymianę ciepła	Metoda optymalizacji
Właściwości termofizyczne płynów	Przewodność cieplna, ciepło właściwe c_p , lepkość	Wyższa przewodność $c_p \Rightarrow$ lepsze przewodzenie/magazynowanie ciepła; niższa lepkość $\Rightarrow$ mniejszy Δp (łatwiejszy przepływ)	Dobór optymalnego płynu roboczego; dodatki poprawiające przewodność/obniżające lepkość; kontrola temperatury pracy
Zanieczyszczenia (fouling)	Osady i warstwy korozyjne tworzące się na powierzchniach wymiany ciepła (kamień, tłuszcz, osad)	Fouling zwiększa opór cieplny i $\Delta p \Rightarrow$ spadek α (efektywności) i $\dot{Q}$	Filtry na wlotach, regularne czyszczenie (chem./mechan.), projekt ułatwiający czyszczenie, materiały antyadhezyjne.

Tabela 7. – legenda:

q'' – gęstość strumienia cieplnego [W/m^2],

$\dot{Q}$ – strumień/moc cieplna [W],

$\dot{Q} = q'' \cdot A$,

$q'' = h(T_{\text{ściany}} - T_{\text{płynu}})$

2.4. Koncepcje konstrukcyjne wymienników ciepła i ich wpływ na efektywność

Przeciwprądowe wymienniki ciepła działają na zasadzie przepływu gorącego i zimnego płynu w przeciwnych kierunkach, co maksymalizuje efektywność wymiany ciepła. Taka konfiguracja przepływu pozwala na utrzymanie bardziej równomiernej różnicy temperatur na całej długości wymiennika, co skutkuje wyższym ogólnym współczynnikiem przenikania ciepła w porównaniu z przepływem równoległym. Wiele nowoczesnych zmywarek, wykorzystuje wymienniki ciepła do wstępnego podgrzewania wody, co często realizowane jest właśnie w konstrukcji przeciwprądowej ze względu na jej wysoką sprawność [77]. W literaturze patentowej można znaleźć liczne przykłady rozwiązań dotyczących przeciwprądowych wymienników ciepła stosowanych w zmywarkach. Przykładowo, patent US7887643B2 (Dishwasher with counter-convection air flow) opisuje zmywarkę z przeciwprądowym przepływem powietrza wspomagającym suszenie [78].

W przepływowych wymiennikach ciepła woda przepływa przez urządzenie, gdzie jest podgrzewana lub chłodzona. W zmywarkach, tego typu wymienniki mogą być zintegrowane z innymi komponentami, takimi jak pompa odpływowa, umożliwiając odzyskiwanie ciepła z odprowadzanej wody lub mogą być wykorzystywane do odzyskiwania ciepła z pary wodnej powstającej podczas cyklu zmywania. Przykładem może być wielokomorowa przemysłowa zmywarka z przenośnikiem taśmowym, która wykorzystuje jednostkę odzysku ciepła (HRU - Heat Recovery Unit) do podgrzewania wody do ostatniego płukania, wykorzystując ciepło z gorącej pary odprowadzanej ze zmywarki [79]. Innym przykładem jest patent EP3865042A1 (Heat exchanger water heating system for commercial dishwasher), który opisuje piekarnik z funkcją odzysku ciepła do zmywarki, gdzie ciepło generowane podczas pieczenia jest wykorzystywane do podgrzewania wody w zmywarce [80]. Patent US20110048342A1 (Heat recovery oven with dishwasher) przedstawia system podgrzewania wody z wymiennikiem ciepła dla komercyjnej zmywarki, wykorzystujący ciepło z odprowadzanej pary.

Zintegrowane wymienniki ciepła są wbudowane w strukturę zmywarki, na przykład w zbiornik na wodę lub w wannę urządzenia. Takie rozwiązanie pozwala na oszczędność miejsca oraz efektywne przekazywanie ciepła dzięki bliskości źródła ciepła lub chłodzenia. Przykładem może być patent EP3639722A1 (Dishwashers having a heat exchanger) opisujący zmywarkę z wymiennikiem ciepła umieszczonym wewnątrz zbiornika na świeżą wodę, który wykorzystuje gorącą wodę odpadową do podgrzewania świeżej wody [81]. Innym przykładem jest patent EP3731720A1 (A heat pump dishwasher) dotyczący zmywarki z pompą ciepła o zwiększonej efektywności [82]. Patent EP3639722A1 (Dishwasher with integrated barrier member) opisuje zmywarkę ze zintegrowanym elementem barierowym [83].

Spiralne wymienniki ciepła charakteryzują się konstrukcją wykorzystującą zwinięte rury lub płyty, co pozwala na uzyskanie dużej powierzchni wymiany ciepła przy stosunkowo niewielkich rozmiarach. Przepływ płynów w wymiennikach spiralnych jest zazwyczaj przeciwpądowy, co przyczynia się do wysokiej efektywności wymiany ciepła. Kompaktowa konstrukcja wymienników spiralnych może być szczególnie korzystna w zastosowaniach w zmywarkach, gdzie przestrzeń jest ograniczona. Przykładem zastosowania spiralnych wymienników ciepła są bojlera i zasobniki ciepłej wody użytkowej.

Modułowe wymienniki ciepła składają się z połączonych ze sobą segmentów, co zapewnia elastyczność w projektowaniu i możliwość dostosowania do różnych rozmiarów i wymagań wydajnościowych zmywarek. Takie rozwiązanie ułatwia również

konserwację i wymianę poszczególnych elementów. Przykładem zastosowania modułowych wymienników ciepła mogą być komercyjne zmywarki przemysłowe, gdzie różne strefy zmywania mogą być wyposażone w przeznaczone moduły wymiany ciepła [84].

Płytowe wymienniki ciepła zbudowane są z szeregu cienkich płyt, między którymi znajdują się kanały przepływowe dla płynów. Taka konstrukcja zapewnia bardzo dużą powierzchnię wymiany ciepła przy stosunkowo niewielkich rozmiarach, co przekłada się na wysoki współczynnik przenikania ciepła. W zależności od sposobu łączenia płyt, wyróżnia się wymienniki płytowe lutowane, skręcane i spawane. Dla zastosowań w zmywarkach, ze względu na wymagania dotyczące trwałości i odporności na korozję, preferowane mogą być wymienniki lutowane lub spawane. Płytowe wymienniki ciepła mogą pracować w różnych konfiguracjach przepływu, w tym przeciwpłukowym, co pozwala na osiągnięcie wysokiej efektywności odzysku ciepła.

2.5. Analiza materiałowa wymienników ciepła

Wysoka przewodność cieplna materiału, z którego wykonany jest wymiennik ciepła, jest kluczowa dla efektywnego przekazywania ciepła między płynami [52]. Metale, takie jak miedź i aluminium, charakteryzują się znacznie wyższą przewodnością cieplną niż stal nierdzewna czy tworzywa sztuczne [85]. Wybór materiału o odpowiedniej przewodności cieplnej jest istotny dla zapewnienia optymalnego tempa wymiany ciepła i efektywnego odzyskiwania energii.

W środowisku zmywarki, gdzie występuje kontakt z wodą, detergentami i zmiennymi temperaturami, materiały użyte do budowy wymiennika ciepła muszą wykazywać wysoką odporność na korozję. Stal nierdzewna, zwłaszcza austenityczne gatunki takie jak 304ST i 316ST, jest powszechnie stosowana ze względu na jej dobrą odporność na korozję [86].

Materiały użyte w wymiennikach ciepła w zmywarkach muszą być w stanie wytrzymać ciśnienie robocze i naprężenia termiczne występujące podczas pracy urządzenia przez cały okres jego eksploatacji. Metale, w tym stal nierdzewna, generalnie oferują lepszą wytrzymałość i trwałość w porównaniu z tworzywami sztucznymi.

Stal nierdzewna jest jednym z najczęściej stosowanych materiałów do budowy wymienników ciepła w zmywarkach ze względu na jej dobre połączenie przewodności

cieplnej, odporności na korozję i trwałości. Aluminium, charakteryzujące się dobrą przewodnością cieplną i mniejszą masą, również znajduje zastosowanie jako alternatywny materiał. Tworzywa sztuczne mogą być wykorzystywane w niektórych komponentach wymienników ciepła, szczególnie tam, gdzie kluczowa jest odporność na korozję, a przewodność cieplna ma mniejsze znaczenie. W nowoczesnych rozwiązaniach, takich jak termoelektryczne pompy ciepła, wykorzystywane są specjalne materiały termoelektryczne [87].

Tabela 8 ilustruje, że choć miedź oferuje najwyższą przewodność cieplną, jej zastosowanie może być ograniczone przez koszty i konieczność stosowania dodatkowych powłok ochronnych. Z kolei aluminium (np.: anodowane), dzięki połączeniu stosunkowo wysokiej przewodności z dobrą odpornością na korozję po odpowiednim zabezpieczeniu powierzchni, stanowi kompromis między wydajnością a trwałością. Stal nierdzewna, mimo niskiej przewodności, oferuje wyjątkową odporność na agresywne środowisko, co czyni ją atrakcyjną w zastosowaniach przemysłowych, gdzie trwałość jest kluczowa. Nowoczesne kompozyty, choć jeszcze w fazie rozwoju, obiecują możliwość łączenia właściwości wysokiej przewodności cieplnej z niską masą i dobrą odpornością chemiczną.

Tabela 8. Porównanie właściwości materiałowych stosowanych w urządzeniach AGD

Material	Przewodność cieplna (W/m·K)	Gęstość (g/cm ³)	Odporność na korozję	Wytrzymałość mechaniczną	Koszt (względny)	Typowe zastosowania w AGD	Uwagi (Zalety i wady)
Miedź [88]	385-401	8.93-8.96	Dobra	Umiarkowana (możliwość zwiększenia)	Średni	Wężownice lodówek i klimatyzatorów, czasem zmywarki	Doskonała przewodność cieplna, dobra odporność na korozję, wysoka gęstość, podatność na korozję amoniakalną, osadzanie się kamienia.
Aluminium [89]	235-237 (czyste), różne dla stopów	2.70	Doskonała	Niska (czyste), wysoka (stopy)	Niski	Wymienniki ciepła lodówek i klimatyzatorów (MCHE), ożebrowanie	Dobra przewodność cieplna, niska gęstość, niski koszt, podatność na korozję w ekstremalnych pH, niższa wytrzymałość niż inne metale.

Material	Przewodność cieplna (W/m·K)	Gęstość (g/cm³)	Odporność na korozję	Wytrzymałość mechaniczną	Koszt (względny)	Typowe zastosowania w AGD	Uwagi (Zalety i wady)
Stal nierdzewna [90]	15-25	7.5-8.0	Doskonała	Wysoka	Średnio-wysoki	Wymienniki ciepła lodówek i zamrażarek (płytowe), zmywarki, suszarki kondensacyjne	Doskonała odporność na korozję, wysoka wytrzymałość, niska przewodność cieplna, wysoka gęstość.
Mosiądz [91]	100-155	8.4-8.73	Dobra	Średnia-Wysoka	Średni	Historycznie zmywarki	Umiarkowana przewodność cieplna, dobra odporność na korozję, wyższa wytrzymałość niż miedź, podatność na od cynkowanie, może zawierać ołów.

Material	Przewodność cieplna (W/m·K)	Gęstość (g/cm³)	Odporność na korozję	Wytrzymałość mechaniczną	Koszt (względny)	Typowe zastosowania w AGD	Uwagi (Zalety i wady)
Brąz [92]	Zmienna (zależna od stopu)	7.4-8.9	Dobra - Doskonała	Wysoka	Wysoki	Historycznie zmywarki, brąz aluminiowy - zastosowania morskie	Dobra odporność na korozję (szczególnie na słoną wodę), wysoka wytrzymałość, zmienna przewodność cieplna, wysoki koszt.
Tytan [93]	11.4-21.9	4.5	Wyjątkowa	Bardzo wysoka (stosunek wytrzymałości do masy)	Bardzo wysoki	Rzadko w standardowych AGD (specjalistyczne zastosowania)	Wyjątkowa odporność na korozję, wysoki stosunek wytrzymałości do masy, bardzo wysoki koszt, niska przewodność cieplna, trudna obróbka.

2.6 Typowe warunki panujące w zmywarce

W praktyce wewnątrz zmywarki cechuje się zestawem specyficznych warunków, które są kluczowe przy projektowaniu systemów odzysku ciepła oraz maksymalizowaniu ich sprawności. Zrozumienie tych warunków pozwala inżynierom precyzyjnie dopasować konstrukcję wymienników ciepła do rzeczywistych warunków pracy urządzenia.

Główne aspekty typowych warunków panujących w zmywarce wraz ze schematem hydraulicznym (Rys. 1).

1. Temperatura wody

Podczas głównego cyklu mycia w zmywarce temperatura wody zazwyczaj utrzymuje się w zakresie 54-60 °C. Taka temperatura jest niezbędna do skutecznego rozpuszczenia i aktywacji detergentu, a także do usunięcia resztek jedzenia i tłuszczu. W fazie płukania temperatura wody jest często podwyższana do około 82 °C, co ma na celu dezynfekcję naczyń i wspomaganie procesu suszenia. Niektóre nowsze modele zmywarek oraz specjalne cykle, takie jak cykl intensywny czy dezynfekujący, mogą osiągać jeszcze wyższe temperatury, nawet do 77-82 °C lub więcej w przypadku zmywarek przemysłowych. W zmywarkach przemysłowych temperatura cyklu mycia może wynosić od 66 °C do 74 °C, a cyklu płukania od 74 °C do 82 °C. Warto zauważyć, że zmywarka zazwyczaj posiada własną grzałkę, która podnosi temperaturę dopływającej gorącej wody do wymaganych poziomów w zależności od wybranego cyklu. Grzałka może podgrzać wodę powyżej 68 °C, a w niektórych modelach nawet do 82 °C. Zatem materiały użyte w zmywarce muszą być odporne na szeroki zakres temperatur i potencjalne cykle termiczne, w tym na krótkotrwałe narażenie na wyższe temperatury podczas cykli dezynfekujących. Co więcej, temperatura powyżej 60 °C z podgrzewacza wody może negatywnie wpływać na działanie enzymów w detergentach, co również należy uwzględnić przy ocenie wydajności materiałów w całym systemie [95, 96].

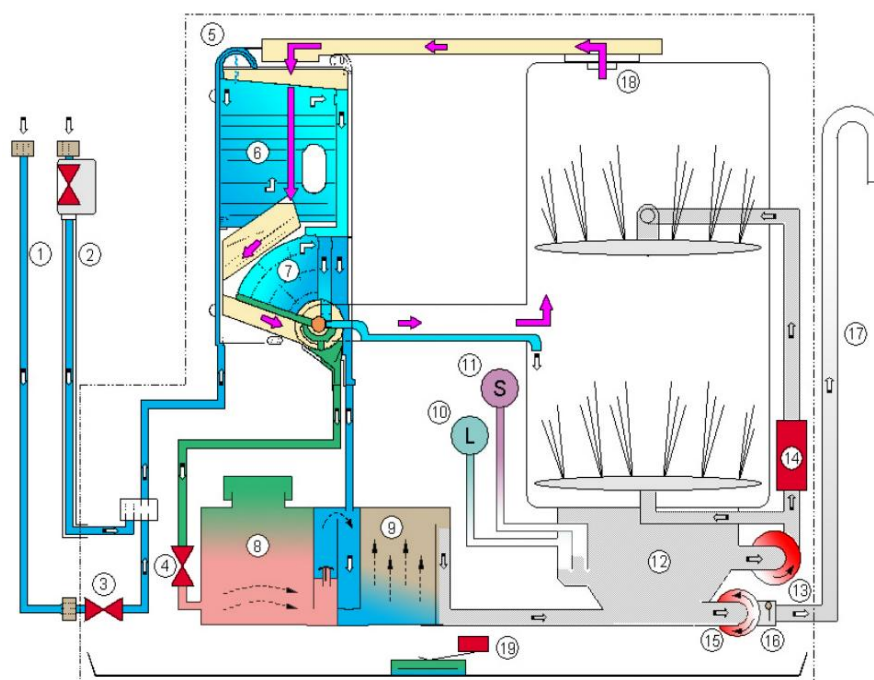
2. Skład chemiczny detergentów do zmywarek

Detergenty do zmywarek to złożone mieszaniny chemiczne, które zazwyczaj mają odczyn alkaliczny i zawierają potencjalnie korozyjne składniki, takie jak środki wybielające i silne sole. Typowe składniki obejmują sole alkaliczne, takie jak węglan sodu, krzemian sodu, a niekiedy fosforany (choć ich użycie jest ograniczane ze względu na ochronę środowiska). Sole alkaliczne skutecznie rozpuszczają tłuszcz, ale mogą być korozyjne [97]. Środki wybielające, zarówno na bazie chloru (np. podchloryn sodu) jak i tlenu (np. nadwęglan sodu), są stosowane do usuwania plam i dezynfekcji. Detergenty zawierają również enzymy (proteazy i amylazy), które rozkładają resztki białkowe i skrobiowe, oraz surfaktanty (często niejonowe) obniżające napięcie

powierzchniowe wody i emulgujące tłuszcze. Często dodawane są także inhibitory korozji, takie jak krzemian sodu, chroniące elementy zmywarki i naczynia [98]. Ponadto w składzie detergentów można znaleźć środki przeciwpienne, środki nablyszczające (zawierające surfaktanty zapobiegające powstawaniu kropelek wody) oraz substancje zapachowe. Optymalne pH dla procesu mycia jest alkaliczne, jednakże enzymy działają najlepiej w środowisku o pH zbliżonym do neutralnego lub lekko alkalicznym, a wybielacze chlorowe są najbardziej efektywne przy pH około 10. Zatem elementy w zmywarce są narażone na działanie środowiska od umiarkowanego do silnie alkalicznego, w zależności od konkretnej formulacji detergentu [99].

3. Czas trwania cykli zmywania

Standardowy cykl zmywania trwa zazwyczaj od 1,5 do 2,5 godziny. Dostępne są również krótsze cykle, trwające 30-60 minut, przeznaczone do lekko zabrudzonych naczyń [100]. Z kolei cykle intensywne i dezynfekujące mogą trwać nawet 3-4 godziny lub dłużej, aby usunąć uporczywe zabrudzenia lub zapewnić dokładną dezynfekcję. Na przykład cykl dezynfekujący może trwać od 3 do 3,5 godziny, a cykl intensywny od 2 do 4 godzin. Tak długi czas trwania cykli oznacza, że materiały w zmywarce są przez dłuższy czas narażone na działanie wysokiej temperatury, wilgoci i substancji chemicznych podczas każdego mycia. Co więcej, w trybach energooszczędnych cykle mogą być jeszcze dłuższe, choć niekoniecznie przy wyższych temperaturach w każdej fazie [101]. To podkreśla znaczenie odporności materiałów na długotrwałe działanie tych czynników.



Rysunek 1. Schemat hydrauliczny zmywarki [94].

Tabela 9. Opis do Rysunku 1.

L.p.	Nazwa	Opis funkcji
1.	Wąż napełniający	Doprowadza wodę sieciową do zmywarki
2.	Wąż napełniający z urządzeniem „Acquacontrol”	Wąż zasilający wodą, wyposażony w czujnik kontroli dopływu i jakości wody
3.	Elektrozawór napełniania	Sterowany zawór solenoidowy otwierany w fazie napełniania komory zmywarki
4.	Elektrozawór regeneracji	Zawór sterujący dozowaniem solanki do złoża jonowymennego w celu regeneracji
5.	Przerwa powietrzna	Zabezpieczenie hydrauliczne (syfon powietrzny) chroniące przed cofaniem się brudnej wody
6.	Skraplacz pary	Chłodzony wymiennik, w którym para wodna z komory zmywania kondensuje się do postaci cieczy
7.	Komora regeneracji złoża	Miejsce, w którym następuje przepłukiwanie żywicy solanką („regeneracja” złoża zmiękczacza)
8.	Zbiornik soli	Zawiera sól tabletkowaną niezbędną do przygotowania roztworu solanki regenerującej złożo
9.	Zbiornik żywicy	Złożo jonowymienne (żywica) zmiękczające twardą wodę przed traktowaniem detergentem
10.	Presostat poziomu	Czujnik ciśnieniowy kontrolujący minimalny i maksymalny poziom wody w zmywarce
11.	Presostat anty-przelewowy	Wyłącza dopływ wody w sytuacji zagrożenia przelania komory zmywania
12.	Zespół misy ociekowej	Podstawa zbierająca i odprowadzająca wodę z komory zmywania
13.	Pompa płuczająca	Pompa tłocząca czystą, zmiękczoną wodę do spryskiwaczy zmywarki (ramion myjących)
14.	Grzałka rurowa	Element grzewczy nagrzewający wodę i wytwarzający parę w fazie suszenia
15.	Pompa odpływowa	Pompa usuwająca zużytą wodę z misy ociekowej do odpływu kanalizacyjnego
16.	Zawór zwrotny	Zapobiega cofaniu się ścieków z instalacji kanalizacyjnej do zmywarki
17.	Wąż odpływowy	Odprowadza brudną wodę do rur kanalizacyjnych
18.	Przewód suszący / wentylator	Układ dystrybucji gorącego powietrza z grzałki do wnętrza komory w fazie suszenia
19.	Urządzenie anty-zalewowe	Niezależne zabezpieczenie (zawór lub czujnik wycieku), blokujące dopływ wody przy awarii

3. Dobór materiałów do wymienników ciepła

Efektywność wymienników ciepła w urządzeniach AGD w dużej mierze zależy od zastosowanych materiałów. Kluczowe parametry to przewodność cieplna, odporność na korozję i działanie detergentów, żywotność oraz koszty produkcji. W przeciwieństwie do ogólnej analizy materiałowej przedstawionej w podrozdziale 2.5, niniejszy rozdział skupia się na doborze optymalnych materiałów do konkretnych (zaproponowanych) rozwiązań wymienników ciepła przeznaczonych do urządzeń AGD.

3.1. Charakterystyka materiałów

W projektowaniu wymienników ciepła kluczową rolę odgrywa wybór odpowiednich materiałów, zwłaszcza dla komponentów narażonych na cykle termiczne i agresywne środowisko chemiczne. Szczególnie istotna jest wysoka przewodność cieplna, gdzie efektywne przekazywanie energii ma zasadnicze znaczenie dla wydajności i energooszczędności urządzenia. Równie ważna jest odporność na korozję, spowodowaną wysoką wilgotnością i temperaturą panującą w zmywarce, oraz na działanie detergentów chemicznych o zróżnicowanym składzie i alkaliczności, co gwarantuje długowieczność i niezawodność komponentów.

Niniejsze badania zawierają szczegółową analizę właściwości stali nierdzewnej 304ST, aluminium anodowanego lub z powłoką ceramiczną, stopów aluminium oraz spiekany węgiel krzemu (SSiC – materiał ceramiczny) pod kątem ich potencjalnego zastosowania w elementach zmywarek. Materiały te zostały wybrane ze względu na ich powszechne zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu oraz ich specyficzne właściwości, które mogą być korzystne w środowisku zmywarki. Stal nierdzewna 304ST jest analizowana jako popularny stop odporny na korozję stosowany w urządzeniach gospodarstwa domowego, stopy aluminium na wysoką przewodność cieplną, aluminium z powłoką ceramiczną na ich lekką konstrukcję i potencjalną odporność chemiczną, a ceramika SSiC ze względu na jej wysoką twardość, przewodność cieplną i odporność chemiczną.

Cele badań sformułowano tak, aby bezpośrednio wiązały się z praktycznymi wymaganiami eksploatacyjnymi w zmywarce. W szczególności badania miały na celu:

- dokładne wyznaczenie charakterystyki przewodności cieplnej każdego z wymienionych materiałów w temperaturach roboczych;

- kompleksowa analiza ich odporności na korozję;
- wysoka wilgotność i podwyższona temperatura;
- szczegółowa ocena odporności tych materiałów na działanie typowych detergentów stosowanych w zmywarkach, z uwzględnieniem różnych składników aktywnych i ich potencjalnego wpływu;
- porównawcza ocena tych właściwości dla wszystkich czterech kategorii materiałów;
- identyfikacja potencjalnych problemów i ograniczeń związanych z zastosowaniem każdego z tych materiałów w zmywarce;
- oraz ostateczne wskazanie, które z analizowanych materiałów są najbardziej odpowiednie do zastosowania w elementach zmywarki wymagających wysokiej przewodności cieplnej oraz odporności na korozję i detergenty chemiczne.

Charakterystyka poszczególnych materiałów:

1. Stal nierdzewna 304ST:

- Przewodność cieplna:

Przewodność cieplna stali nierdzewnej jest stosunkowo niska i wynosi zazwyczaj około 16,2 [W/(m·K)] w temperaturze pokojowej, wzrastając nieznacznie wraz z temperaturą (np. 21,5 [W/(m·K)] w temperaturze 500 °C). Niektóre źródła podają zakres 15-25 [W/(m·K)] [102], a inne 14-17 [W/(m·K)] [103]. Konkretnie wartości przewodności cieplnej stali nierdzewnej w różnych temperaturach to: 16,2 [W/(m·K)] przy 20 °C i 100°C, 18,4 [W/(m·K)] przy 300 °C i 21,5 [W/(m·K)] przy 500 °C. W porównaniu z żelazem, stal nierdzewna charakteryzuje się niższą przewodnością cieplną. Nie jest dobrym przewodnikiem ciepła, co może ograniczać jej zastosowanie w komponentach wymagających wysokiej efektywności wymiany ciepła. Jednakże jej niższa przewodność może być korzystna w aplikacjach, gdzie pożądane jest zatrzymanie ciepła lub izolacja.

- Odporność na korozję:

Stal nierdzewna charakteryzuje się doskonałą odpornością na korozję w wielu środowiskach dzięki tworzeniu ochronnej warstwy tlenku chromu. Tworzy ona pasywną warstwę tlenku chromu, która chroni przed rdzą i korozją [104]. Jednakże jest ona podatna na korozję wżerową i szczelinową w ciepłych środowiskach bogatych w chlorki, które występują w zmywarkach ze względu na stosowanie detergentów zawierających chlorki i potencjalnie twardą wodę. W ciepłych środowiskach bogatych

w chlorki stal nierdzewna jest podatna na korozję wżerową i szczelinową [105]. Ciągłe użytkowanie w temperaturach między 425-860 °C może prowadzić do korozji, chociaż typowe temperatury w zmywarce są niższe od tego zakresu [106]. Jest odporna na korozję, ale w środowisku zmywarki może dochodzić do lokalnej korozji, zwłaszcza przy wysokich stężeniach chlorków i długotrwałym narażeniu.

- Odporność na detergenty chemiczne:

Stal nierdzewna generalnie wykazuje doskonałą kompatybilność z detergentami w typowych temperaturach roboczych. Jest niereaktywna w stosunku do detergentów do zmywarek. Jednakże długotrwałe narażenie na silne detergenty może potencjalnie zmatowić lub wytrawić ochronną warstwę [107]. Bezpośredni kontakt z silnie alkalicznym detergentem może również powodować wżery [108]. Jest odporna na detergenty do zmywarek, co czyni ją odpowiednim materiałem dla wielu komponentów zmywarki, ale należy unikać długotrwałego narażenia na silnie skoncentrowane detergenty i dbać o odpowiednie płukanie.

2. Aluminium anodowane:

- Przewodność cieplna:

Anodowanie tworzy na powierzchni metalicznej cienką warstwę tlenku (Al_2O_3) o grubości zwykle od 5 do 25 μm . Ponieważ tlenek aluminium ma nieco gorszą przewodność cieplną niż czyste aluminium, całkowita przewodność termiczna anodowanego elementu jest nieznacznie obniżona w porównaniu z surowym materiałem – typowo o kilka-kilkanaście procent. Dla aluminium o bazowej przewodności 150 $\text{W/m}\cdot\text{K}$ można się spodziewać wartości efektywnej rzędu 130–140 [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$] przy grubości powłoki ok. 15 μm .

- Odporność na korozję:

Powierzchniowa, porowata struktura warstwy tlenkowej znacznie zwiększa naturalną odporność na korozję, szczególnie w środowiskach wilgotnych i kwaśnych. Anodowana warstwa działa jak bariera, chroniąc stop aluminium przed bezpośrednim kontaktem z czynnikami korozyjnymi. W praktyce anodowane elementy wykazują odporność porównywalną lub nawet lepszą od stali nierdzewnej, o ile powłoka nie zostanie mechanicznie uszkodzona [109].

- Odporność na detergenty chemiczne:

Anodowana powłoka jest chemicznie obojętna w szerokim zakresie pH (zwykle od ~4 do ~9). Dzięki temu toleruje większość łagodnych detergentów myjących stosowanych w zmywarkach. Niemniej jednak:

- Silnie alkaliczne środki ($\text{pH} > 10$) mogą stopniowo rozpuścić i zmatowić warstwę tlenkową.
- Bardzo kwaśne płyny ($\text{pH} < 3$) mogą lokalnie rozpuszczać tlenek i odsłaniać metal pod spodem.
- Aby wydłużyć żywotność powłoki, zaleca się używanie detergentów o zbliżonym do neutralnego pH oraz dokładne spłukiwanie po cyklu zmywania.

3. Stopy Aluminium

- Przewodność cieplna:

Stopy aluminium charakteryzują się dobrą do bardzo dobrej przewodnością cieplną, zazwyczaj w zakresie ok. 115-218 [W/(m·K)] w temperaturze pokojowej. Jest to wartość znacznie wyższa w porównaniu do stali nierdzewnej, co czyni je efektywnymi w aplikacjach wymagających dobrej wymiany ciepła [110].

- Odporność na korozję:

Naturalnie tworzą na powierzchni ochronną warstwę tlenku glinu. Są jednak podatne na korozję wżerową w środowiskach zawierających chlorki (obecne w detergentach lub twardej wodzie) oraz na działanie substancji o odczynie alkalicznym, które mogą występować w zmywarkach. W typowych warunkach zmywarki (podwyższona temperatura, wilgoć, chemikalia), ich odporność korozyjna jest generalnie niższa niż stali nierdzewnej, jeśli nie są dodatkowo zabezpieczone (np. przez anodowanie) [109].

- Odporność na detergenty chemiczne:

Stopy aluminium są wrażliwe na skrajne wartości pH, szczególnie na silnie alkaliczne detergenty często stosowane w zmywarkach. Kontakt z takimi detergentami może prowadzić do matowienia powierzchni, jej trawienia lub nawet korozji. Długotrwałe narażenie, zwłaszcza bez dokładnego spłukania, może skutkować uszkodzeniem materiału; zaleca się stosowanie detergentów o neutralnym pH lub przeznaczonych do aluminium oraz staranne płukanie.

4. Aluminium z powłoką ceramiczną ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$):

- Przewodność cieplna:

Aluminium jako materiał bazowy, cechuje się bardzo wysoką przewodnością cieplną – około 237 [W/(m·K)]. W przypadku zastosowania powłoki ceramicznej, typowo opartej na tlenku glinu (Al_2O_3), przewodność cieplna znacząco spada – warstwa ta ma wartość rzędu 25–35 [W/(m·K)], w zależności od porowatości, grubości i metody osadzania. Typowa grubość powłoki anodowej wynosi od 5 do 25 mikrometrów (dla ochronnych warstw technicznych), natomiast w powłokach natryskiwanych może sięgać nawet 100 μm . Chociaż ceramiczna warstwa spowalnia przewodzenie ciepła w porównaniu do samego aluminium, jej znacznie wyższa przewodność cieplna niż w przypadku tworzyw sztucznych (np. FEP) [111,112] nadal pozwala na efektywny transfer energii, zachowując przy tym właściwości ochronne.

- Odporność na korozję:

Powłoki ceramiczne, zwłaszcza na bazie Al_2O_3 , zapewniają bardzo dobrą odporność na korozję, tworząc twardą, pasywną barierę dla środowiska agresywnego chemicznie i termicznie. Anodowane aluminium jest szczególnie odporne na wilgoć, wysokie temperatury i zasadowe środowiska typowe dla zmywarek czy pralek. W odróżnieniu od niepowlekanego aluminium, które ulega korozji w kontakcie z detergentami (powstawanie wżerów, białych nalotów, ciemnienie), warstwa ceramiczna skutecznie chroni podłoże. Istotna jest jednak jednorodność i szczelność powłoki – wszelkie uszkodzenia mechaniczne mogą lokalnie osłabić jej działanie ochronne.

- Odporność na detergenty chemiczne:

Ceramiczne powłoki aluminiowe wykazują wysoką odporność na działanie większości detergentów stosowanych w urządzeniach AGD, w tym alkalicznych środków do zmywarek i płynów nabłyszczających. Ich obojętny charakter chemiczny oraz odporność na hydrolizę w podwyższonej temperaturze sprawiają, że są one stabilne w długim czasie użytkowania. Dodatkowo, ceramika nie ulega degradacji pod wpływem wysokiej wilgotności ani temperatury, co czyni ją atrakcyjną alternatywą w aplikacjach wymagających odporności i długowieczności przy jednoczesnym zachowaniu dobrej przewodności cieplnej.

5. Spiekany węgiel krzemu (SSiC):

- Przewodność cieplna:

Ceramika SSiC charakteryzuje się wysoką przewodnością cieplną, w zakresie od 100 do 200 [W/(m·K)], a nawet wyższą w niektórych specyficznych gatunkach (np. IntrinSiC® przy 200 [W/(m·K)], CarSIK-G przy 160 [W/(m·K)], SiSiC-CS11 dziesięciokrotnie lepsza niż stal nierdzewna, co odpowiada około 160 [W/(m·K)]) [113].

Niektóre gatunki, takie jak CarSIK-NG, mają niższą przewodność cieplną (12 [W/(m·K)]) [114]. Ceramika SSiC oferuje doskonałą przewodność cieplną, co czyni ją wysoce odpowiednią do zastosowań w zmywarce, które wymagają efektywnego transferu ciepła.

- Odporność na korozję:

Ceramika SSiC wykazuje wyjątkowo wysoką odporność na korozję w środowiskach kwasowych i zasadowych, nawet w wysokich temperaturach. Jest generalnie obojętna w stosunku do większości chemikaliów, kwasów, zasad i rozpuszczalników. Odporność ceramiki SSiC na korozję w warunkach wysokiej wilgotności i temperatury jest wyjątkowo wysoka, co czyni ją bardzo trwałym rozwiązaniem.

- Odporność na detergenty chemiczne:

Ceramika SSiC jest generalnie odporna na detergenty chemiczne stosowane w zmywarkach. Testy potwierdzają odporność ceramiki na alkaliczne detergenty do zmywarek w podwyższonych temperaturach. Sama ceramika SSiC wykazuje silną odporność na detergenty do zmywarek. Jeśli jednak komponent SSiC zawiera szkliwo, należy wziąć pod uwagę odporność tego szkliwa na długotrwałe narażenie na agresywne detergenty.

Z powyższej analizy wynika, że ceramika SSiC i stopy aluminium oferują najwyższą przewodność cieplną spośród ocenianych materiałów (Tabela 10), podczas gdy stal nierdzewna ma niższe wartości. Odporność żelaza na korozję w środowisku zmywarki jest słaba, co czyni je nieodpowiednim do większości zastosowań. Stal nierdzewna wykazuje ogólnie dobrą odporność na korozję, ale jest podatna na wżery w środowiskach bogatych w chlorki. Powłoki ceramiczne zapewniają dobrą ochronę stopów aluminium przed korozją, pod warunkiem nienaruszenia powłoki. Ceramika SSiC wyróżnia się doskonałą odpornością na korozję w środowisku zmywarki. Pod względem odporności na detergenty chemiczne, stal nierdzewna, ceramika i SSiC wykazują generalnie dobrą do doskonałej odporności, natomiast żelazo wypada słabo.

Ceramika SiC (SSiC) łącząca dobrą przewodność cieplną z odpornością na korozję i działanie detergentów wydaje się być najbardziej obiecującym materiałem dla wymienników w zmywarkach. Alternatywą są stopy aluminium z warstwą ceramiczną — dają one wysoką sprawność termiczną metalu przy dodatkowej ochronie, o ile powłoka pozostanie trwała. Stal nierdzewna gwarantuje solidność i przyzwoitą odporność chemiczną, jednak ma niższą przewodność cieplną i w agresywnym środowisku może miejscami korodować.

W Tabeli 10 umieszczono także trzy powszechne materiały porównawcze: FEP, żelazo (Fe) oraz PVC. FEP (fluoropolimer) wyróżnia się znakomitą odpornością chemiczną i niską energią powierzchniową — ułatwia czyszczenie i ogranicza przywieranie zabrudzeń, lecz jego przewodność cieplna jest bardzo niska, dlatego stosuje się go głównie jako powłokę lub wkładkę, a nie jako aktywny element wymiany ciepła. Żelazo to klasyczne rozwiązanie metaliczne o stosunkowo wysokiej przewodności i dobrej wytrzymałości mechanicznej, które jednak wymaga zabezpieczeń antykorozyjnych (powłoki, inhibitory, pasywacja) ze względu na wrażliwość na alkaliczne detergenty i jony chlorkowe. PVC jest tanim materiałem konstrukcyjnym o przyzwoitej odporności na niektóre roztwory alkaliczne, ale ma ograniczenia temperaturowe i niską przewodność cieplną — zwykle pełni rolę elementu konstrukcyjnego lub izolacyjnego, nie nośnika intensywnej wymiany ciepła.

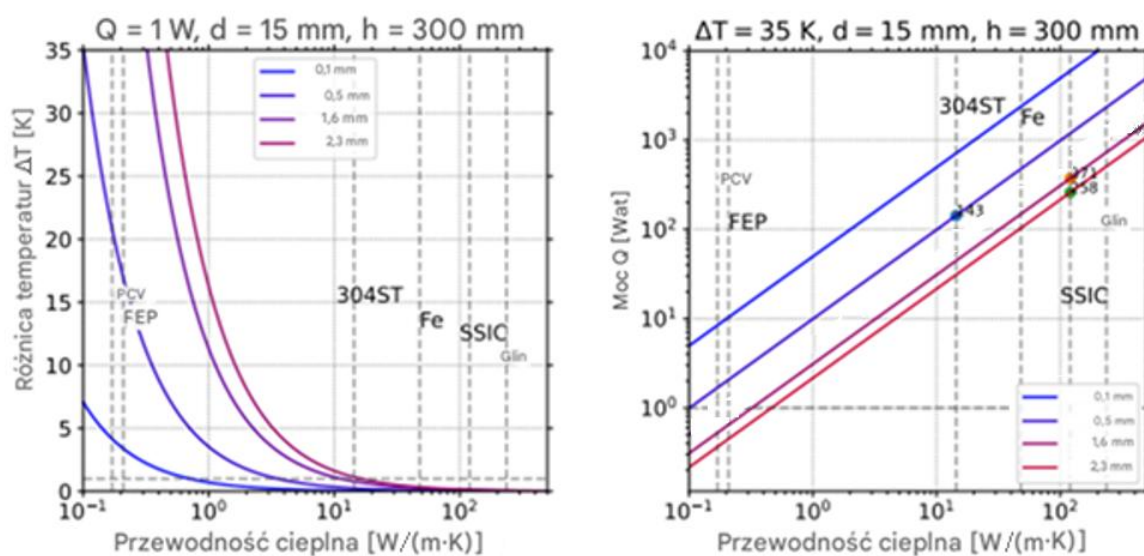
Dołączenie FEP, Fe i PVC ma ułatwić ocenę kompromisów między przewodnością cieplną, odpornością chemiczną i kosztem oraz szybkie porównanie badanych materiałów z typowymi rozwiązaniami powłokowymi, metalicznymi i polimerowymi.

Tabela 10. Kluczowe właściwości materiałów.

Kategoria materiału	Przewodność cieplna [W/(m·K)]	Odporność na korozję	Odporność na detergenty chemiczne
Stal nierdzewna (304ST)	15 – 21,5	dobra (potencjalne wżery)	doskonała (potencjalne matowienie)
Aluminium anodowane	~155-180	Bardzo dobra (zabezpieczenie elektrochemiczne)	Średnia do dobrej (w zależności od pH i temperatury)
Stopy aluminium	115-218	średnia	słaba
Aluminium z powłoką ceramiczną	wysoka (200+ dla Al, niska dla ceramiki)	dobra (jeśli powłoka nienaruszona)	dobra do doskonałej

Kategoria materiału	Przewodność cieplna [W/(m·K)]	Odporność na korozję	Odporność na detergenty chemiczne
Ceramika SSiC	100 - 200+	doskonała	doskonała (szkliwo może się różnić)
FEP	~ 0,25	doskonała	doskonała
Żelazo	~ 80	Słaba (łatwo koroduje)	Średnia (może ulegać matowieniu i korozji pod wpływem silnych detergentów)
PVC	0,19 – 0,25	Dobra (odporna na wiele kwasów, ale wrażliwa na UV)	Dobra (odporność na detergenty i łagodne chemikalia)

Rysunek 2 przedstawia dwa wykresy przedstawiające zależność przewodności cieplnej od różnicy temperatur (ΔT) oraz mocy ($\dot{Q}$).



Rysunek 2. Porównanie przewodności cieplnej zależnej od grubości materiału.

Główne osie wykresów i ich znaczenie:

- Oś X (pozioma): przewodność cieplna [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$] – wspólna dla obu wykresów, przedstawia zdolność materiału do przewodzenia ciepła w szerokim zakresie (od 10^{-1} do 10^3 , skala logarytmiczna). Materiały o niskiej przewodności cieplnej (lewa strona osi, np. PCV, FEP) są dobrymi izolatorami, natomiast te o wysokiej przewodności (prawa strona osi, np. żelazo, aluminium) są dobrymi przewodnikami ciepła.
- Krzywe: na obu wykresach te same cztery krzywe (niebieska, fioletowa, bordowa i czerwona) reprezentują różne grubości warstwy: 0,1 mm, 0,5 mm, 1,6 mm i 2,3 mm. Pozwala to na analizę wpływu grubości na przepływ ciepła lub różnicę temperatur.
- Pionowe linie przerywane: oznaczają typowe wartości przewodności cieplnej dla wybranych materiałów inżynierskich (PCV, FEP, 304ST, Fe, SSiC, Glin), co ułatwia interpretację w kontekście konkretnych zastosowań.

Wykres 1 (lewy): zależność różnicy temperatur (ΔT) od przewodności cieplnej przy stałej mocy cieplnej ($Q = 1 \text{ W}$).

Wykres ten pokazuje, jak duża różnica temperatur powstaje w elemencie, gdy przez niego przepływa stała, niewielka ilość ciepła (1 W).

Dla stałej mocy cieplnej, im niższa przewodność cieplna materiału (czyli im lepszy izolator) i im grubsza warstwa, tym większa różnica temperatur będzie utrzymywana. Jest to zgodne z intuicją – dobry izolator skutecznie "zatrzymuje" ciepło, co prowadzi do znacznego gradientu temperatury.

Przykład: Jeśli chcielibyśmy utrzymać różnicę temperatur około 30 K przy przepływie 1 W ciepła, musielibyśmy zastosować materiał o bardzo niskiej przewodności cieplnej, taki jak FEP (ok. $0,2 \text{ [W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$), w warstwie o grubości co najmniej 1,6 mm (bordowa linia). Z kolei dla stali nierdzewnej (304ST, ok. $15 \text{ [W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$) i tej samej grubości, różnica temperatur byłaby minimalna, bliska 0 K, co świadczy o jej słabych właściwościach izolacyjnych w tych warunkach.

Wykres 2 (prawy): zależność mocy cieplnej (Q) od przewodności cieplnej (λ) przy stałej różnicy temperatur ($\Delta T = 35 \text{ K}$).

Ten wykres skupia się na tym, ile ciepła (Q) przepływa przez element, gdy na jego końcach utrzymywana jest stała, znaczna różnica temperatur ($\Delta T = 35 \text{ K}$).

Dla stałej różnicy temperatur, im wyższa przewodność cieplna materiału (czyli im lepszy przewodnik ciepła) i im cieńsza warstwa, tym większa moc cieplna będzie przez niego

przepływać. Dobre przewodniki ciepła efektywnie "przenoszą" ciepło, nawet przy tej samej różnicy temperatur.

Przykład: Aby efektywnie odprowadzić ciepło, np. w systemie chłodzenia, zastosowanie aluminium (Glin, ok. 200 [W/(m·K)]) w cienkiej warstwie (np. 0,1 mm, niebieska linia) pozwoliłoby na przepływ mocy rzędu 104 W (10 kW) przy różnicy temperatur 35 K. Natomiast użycie materiału izolacyjnego, jak PCV (ok. 0,15 [W/(m·K)]) nawet w cienkiej warstwie 0,1 mm, ograniczyłoby przepływ ciepła do zaledwie kilkudziesięciu Watów, co podkreśla jego izolacyjne właściwości.

Obydwa wykresy, choć przedstawiają różne perspektywy, są ze sobą silnie powiązane i opierają się na fundamentalnej zasadzie przewodnictwa cieplnego. Można je interpretować jako dwie strony tego samego medalu.

Wykres 1 jest kluczowy przy projektowaniu izolacji termicznych, gdzie celem jest minimalizacja przepływu ciepła i utrzymanie jak największej różnicy temperatur (np. ściany budynków, izolacje rurociągów).

Wykres 2 jest nieodzowny w aplikacjach wymagających efektywnego odprowadzania ciepła (np. radiatory, wymienniki ciepła, układy elektroniczne), gdzie celem jest maksymalizacja przepływu ciepła przy akceptowalnej różnicy temperatur.

Analiza obu wykresów pozwala na optymalny dobór materiału i grubości warstwy w zależności od konkretnych wymagań projektowych – czy to minimalizacji strat ciepła, czy maksymalizacji jego transferu.

Wnioski z analizy materiałów:

- Znaczenie przewodności (λ): materiały o wyższej λ (np. aluminium, ceramika SiC) mogą efektywniej transportować ciepło przy cienkiej ścianie, co pozwala zmniejszyć masę i wielkość wymiennika.
- Wpływ grubości (δ): zwiększenie grubości materiału znacząco pogarsza przenoszenie ciepła, ponieważ wzrasta opór cieplny. W praktyce trzeba znaleźć kompromis między wymogami wytrzymałościowymi a wymaganą efektywnością termiczną.
- Dobór materiału a środowisko pracy: w zmywarce materiał wymiennika musi być odporny na korozję (kontakt z wodą, detergentami), mieć wystarczającą wytrzymałość mechaniczną i być ekonomicznie uzasadniony. Dlatego często wybiera się stal nierdzewną lub powlekane aluminium, nawet jeśli nie oferują one najwyższej możliwej przewodności cieplnej (λ).

- Różnica temperatur (ΔT): przy większych wartościach ΔT możliwe jest skuteczne wykorzystanie materiałów o średniej przewodności, ale w aplikacjach, gdzie ΔT jest ograniczone (np. niewielkie różnice temperatur), wybór materiału o wysokiej λ staje się kluczowy.

Podsumowując, analiza materiałów o wysokiej przewodności cieplnej pokazuje, że nie tylko sama wartość λ decyduje o efektywności wymiany ciepła, lecz także grubość ścianki, odporność korozyjna i koszty produkcji. W zależności od zastosowania (np. rura wymiennika w zmywarce) należy znaleźć optymalny kompromis między tymi czynnikami, aby osiągnąć pożądaną wydajność cieplną przy zachowaniu wymagań eksploatacyjnych i ekonomicznych.

3.2. Odporność na korozję i działanie detergentów

W środowisku pracy wymiennika ciepła np. w zmywarce materiały narażone są na dynamiczne oddziaływanie wysokiej temperatury (40–75 °C), roztworów silnie alkalicznych (pH 10–12) zawierających surfaktanty, fosforany, cytryniany oraz chlorki, a także na cykliczne napełnianie i suszenie. Niektóre materiały takie jak stal nierdzewna 316L zawierają dodatki molibdenu, które poprawiają odporność na korozję w środowiskach kwaśnych i chlorowanych. [116,117]

Poniżej przedstawiono najważniejsze mechanizmy korozji oraz metody oceny odporności materiałów w takich warunkach.

Mechanizmy degradacji

1. Korozja elektrochemiczna zachodząca w wymiennikach ciepła wynika z kontaktu metalu z wodą i jonami detergentów. Polega na utlenianiu metalu o niższym potencjale elektrochemicznym (anoda) oraz redukcji np. tlenu na powierzchni bardziej szlachetnej katody. Różnica potencjałów generuje prąd galwaniczny, który napędza utlenianie anody. Proces ten może być opisany równaniem *Nernsta* [118]:

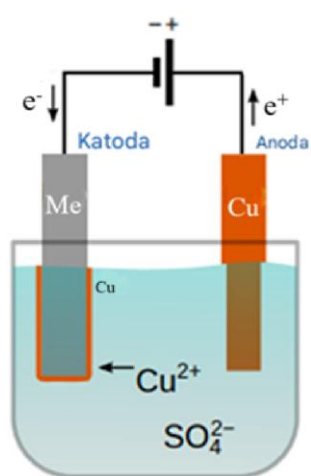
$$E = E^0 - \frac{RT}{zF} \ln \left[\frac{[ox]}{[red]} \right] [V] \quad (4)$$

gdzie E to potencjał elektrochemiczny [V], E^0 - potencjał standardowy [V], R - stała gazowa 8,314462618 [J/(mol·K)], T - temperatura [K], z - liczba elektronów, F - stała

Faradaya 96485,332 (C/mol), $[ox]$ - stężenie molowe formy utlenionej, $[red]$ - stężenie molowe formy zredukowanej.

Poniżej przedstawiono i omówiono dwa procesy: korozję elektrochemiczną oraz działanie ogniwa Daniella jako modelu korozji galwanicznej [119]:

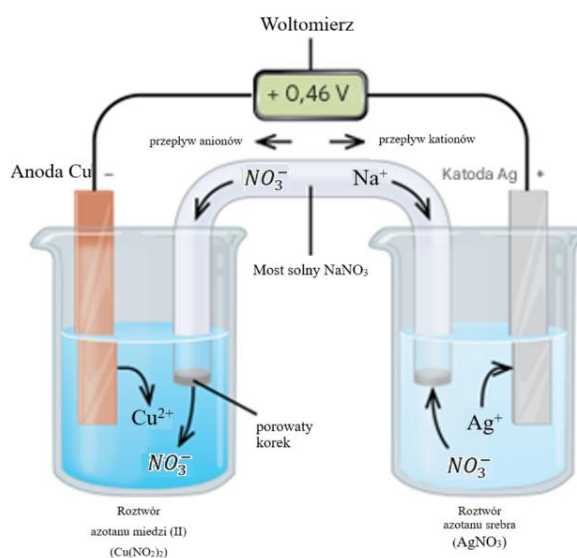
- Na Rysunku 2 zilustrowano sytuację, w której aktywny metal (Me) np. żelazo i miedź (Cu) są zanurzone w elektrolicie zawierającym jony siarczanowe (SO_4^{2-}). Miedź działa jako anoda i ulega korozji, uwalniając jony Cu^{2+} . Metal (Me) działa jako katoda, gdzie nie zachodzi korozja, ponieważ elektrony przepływają do niej z anody.



Rysunek 3. Zjawisko korozji elektrochemicznej

- Ogniwo Daniella to klasyczny model ogniwa galwanicznego, w którym półogniwo cynkowe (anoda) i półogniwo miedziane (katoda) połączone mostkiem solnym. Różnica potencjałów tych metali generuje mieralne napięcie, co pozwala ocenić względną aktywność elektrochemiczną materiałów i przewidzieć ich skłonność do korozji galwanicznej. Ogniwo Daniella (Rys. 4) w którym energia chemiczna jest zamieniana na energię elektryczną. Można szybko sprawdzić, które metale (lub stopy) są bardziej narażone na korozję w typowym elektrolicie (woda z jonami), a które zachowują się jak katoda. W tym układzie różnica potencjałów między elektrodami wynika z różnej skłonności metali do oddawania lub przyjmowania elektronów. Jony Cu^{2+} i Ag^{+} przepływają w elektrolicie, a mostek solny ($NaNO_3$) zapobiega gromadzeniu się nadmiaru ładunków, utrzymując równowagę elektrochemiczną. Anodą jest elektroda miedziana (Cu), która ulega utlenieniu ($Cu \rightarrow Cu^{2+} + 2e^{-}$). Katodą jest elektroda srebra (Ag), gdzie zachodzi

redukcja ($Ag^+ + e^- \rightarrow Ag$). Mostek solny ($NaNO_3$) zapewnia przepływ jonów, równoważąc ładunki. Woltomierz pokazuje powstałe napięcie (0,46 V), wskazując, że proces elektrochemiczny zachodzi spontanicznie. Pomiar napięcia otwartego obwodu oraz badania pętli polaryzacyjnych przy użyciu Ognia Daniella pozwalają określić kinetykę reakcji utleniania i redukcji, a także wartość prądu galwanicznego, który odpowiada rzeczywistej prędkości korozji. W ten sposób można porównać odporność różnych stopów (np. stali nierdzewnych, aluminium czy stopów cynku) oraz ocenić, które z nich w warunkach styku z miedzią będą zachowywać się bardziej „anodowo” i wymagać dodatkowej ochrony antykorozyjnej.



Rysunek 4. Ogniwko Daniella (ogniwko galwaniczne).

2. Korozja wżerowa

Lokalnie obniżone pH i koncentracja jonów Cl^- w zagłębieniach pasywnej warstwy tlenkowej inicjują mikrowżery, prowadząc do głębokich ubytków materiału.

3. Korozja szczelinowa

W ciasnych przestrzeniach (np. uszczelkach, połączeniach płyt) ograniczony dostęp tlenu i nagromadzenie agresywnego roztworu detergentowego powodują gwałtowny spadek pH i miejscowe wżery.

4. Korozja naprężeniowa

Występuje w stopach nierdzewnych pod wpływem jednoczesnego działania naprężeń mechanicznych i agresywnego środowiska alkaliczno-chlorowego, prowadząc do pęknięć międzykrystalicznych.

Parametry i metody oceny

- Potencjał korozyjny (E_{corr}) i gęstość prądu korozji (j_{corr}) [120] mierzone w pętłach polaryzacyjnych lub techniką *LPR* (*Linear Polarization Resistance*) [121] stanowią bezpośrednie wskaźniki trwałości pasywnej warstwy i szybkości reakcji utleniania.
- Spektroskopia impedancyjna (*EIS*) pozwala ocenić strukturę i ciągłość warstwy ochronnej na elektrodzie poprzez pomiar oporu polaryzacyjnego (R_p) [122].
- Testy utraty masy (*weight-loss*) przeprowadza się w cyklicznych warunkach „zimno–gorąco–detergent–płukanie”, co pozwala oszacować śr. szybkość korozji (mm/rok).
- Normy i metody: ASTM G48 (*pitting*) [123], ISO 17864 (*crevice corrosion*) [124], ASTM G102 (przeliczanie j_{corr} na szybkość korozji przy użyciu ekwiwalentu wagowego) [118].

Wpływ składu stopu i mikrostruktury

- Stale nierdzewne:
 - 304L (18 % Cr, 8 % Ni) cechuje się dobrą odpornością ogólną, lecz jest podatna na wżery w obecności Cl^- .
 - 316L (16 % Cr, 10 % Ni, 2 % Mo) dzięki molibdenowi wykazuje wyższą odporność na korozję wżerową i szczelinową.
 - Stopy z dodatkiem azotu i zwiększoną zawartością Cr/Mo (np. 444) oferują dalsze wzmocnienie pasywacji.
- Aluminium i jego stopy: tworzą cienką warstwę tlenku, jednak w roztworach alkalicznych i przy obecności kompleksujących związków mogą ulegać szybkiemu rozpuszczaniu.
- Miedź i stopy miedzi: wykazują wysoką odporność ogólną, ale mogą być katodą w sprzężeniach galwanicznych z bardziej aktywnymi metalami.

Strategie ochrony

- Pasywacja chemiczna: obróbka kwasem azotowym lub chromianami wytwarza stabilną warstwę tlenkową.
- Powłoki polimerowe lub ceramiczne: barierowe warstwy fluoropolimerowe czy epoksydowe zapobiegają bezpośredniemu kontaktowi z detergentem.
- Ochrona katodowa/anodowa: stosowanie anod ofiarnych (np. cynkowych) lub polaryzacja katodowa pozwala przenieść korozję na wymienne elementy, oszczędzając główną konstrukcję wymiennika.

3.3. Badania laboratoryjne materiałów

W celu oceny właściwości materiałów w warunkach zbliżonych do rzeczywistych zastosowań, przeprowadzono szereg badań laboratoryjnych, mających na celu określenie odporności korozyjnej oraz wpływu ekspozycji chemicznej na powierzchnię próbek. Testy te zostały przeprowadzone zgodnie z wewnętrznymi procedurami badawczymi, obejmującymi zarówno przygotowanie próbek, jak i analizę wyników.

Metodyka badań zanurzeniowych (immersyjnych)

Przeprowadzone badania obejmowały ekspozycję próbek na działanie różnorodnych substancji chemicznych typowych dla środowiska pracy urządzeń AGD. Proces testowy składał się z następujących etapów:

1. Przygotowanie próbek:

- Próbki przygotowano z dostarczonych rurek przez przycięcie do wymiaru i sfazowanie krawędzi w celu usunięcia nierówności oraz pozostałości po cięciu. (Rys. 5)



Rysunek 5. Przykładowe próbki materiałów (AL, 304ST, SSiC)

2. Środowisko testowe:

- Badania przeprowadzono w warunkach zanurzeniowych, z pełnym zanurzeniem próbek w roztworach o określonych stężeniach. Temperatura testowa w piecu wynosiła 80 °C, a czas ekspozycji wynosił 168 godzin.
- Zastosowano następujące media testowe:
 - 5% wodny roztwór środka nabyłszczającego (firmy Somat),

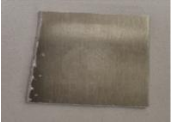
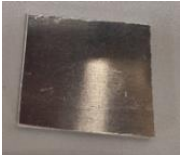
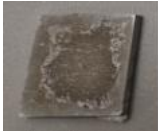
- 5% wodny roztwór detergentu (firmy Neophos – skandynawska wersja detergentu firmy Finish – jest bardziej agresywny ze względu na bardzo twardą wodę występującą w tym regionie Europy),
 - 100% koncentrat środka nablyszczającego,
 - 80% skoncentrowana pasta detergentu na bazie wody (Neophos),
 - Emulsja STIWA (skumulowana kostka ze składnikami takimi jak: tłuszcze, białka, skrobia, cząstki organiczne i nieorganiczne)
3. Aparatura badawcza:
- Testy zanurzeniowe przeprowadzono w szklanych pojemnikach laboratoryjnych umieszczonych w piecu laboratoryjnym o kontrolowanej temperaturze (Rys. 6).

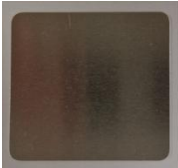


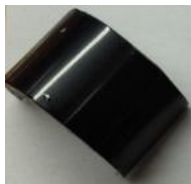
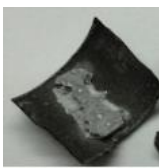
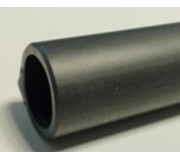
Rysunek 6. Stanowisko do badań immersyjnych próbek materiałowych w piecu.

4. Ocena wyników:
- Po zakończeniu ekspozycji próbki zostały poddane wizualnej ocenie stanu powierzchni. Dokumentacja fotograficzna została wykonana dla każdej próbki przed i po testach w każdym z zastosowanych mediów.
 - W przypadku wystąpienia widocznych zmian na powierzchni, takich jak osady, zmiany barwy lub degradacja warstwy ochronnej, dokonano szczegółowej analizy strukturalnej, aby ocenić potencjalny wpływ na funkcjonalność materiału (Tabela 11).

Tabela 11. Podsumowanie wyników testów zanurzeniowych.

Material	Zdjęcie próbki	Test zanurzeniowy (immersyjny)					Komentarz
		5% Somat	100% Somat	5% Neophos	80% Neophos	STIWA	
AL 5754 (stop aluminium-magnez)		 OK	 OK	 NOK	 NOK	 OK	Na powierzchni płytki pojawił się osad, który przyczynia się do zmniejszenia wymiany ciepła. Brak rekomendacji do dalszych badań.
AL 5083 (stop aluminium-magnez)		 NOK	 NOK	 NOK	 NOK	 OK	Na powierzchni płytki pojawił się osad, który przyczynia się do zmniejszenia wymiany ciepła. Brak rekomendacji do dalszych badań.
AL 5052 (stop aluminium-magnez-chrom)		 OK	 OK	Próbka się rozpuściła NOK	 NOK	 OK	Na powierzchni płytki pojawił się osad, który przyczynia się do zmniejszenia wymiany ciepła. Brak rekomendacji do dalszych badań.

Material	Zdjęcie próbki	Test zanurzeniowy (immersyjny)					Komentarz
		5% Somat	100% Somat	5% Neophos	80% Neophos	STIWA	
AL 6082 (stop aluminium-magnez-krzem)		 OK	 OK	 NOK	 NOK	 NOK	Na powierzchni płytki pojawił się osad, który przyczynia się do zmniejszenia wymiany ciepła. Brak rekomendacji do dalszych badań.
304ST (stal nierdzewna)		 OK	 OK	 OK	 OK	 OK	Powierzchnia nie zmieniła się. Rekomendacja do dalszych badań.
AL 6063 (stop aluminium-magnez-krzem)		 OK	 OK	 NOK	 NOK	 OK	Na powierzchni płytki pojawił się osad oraz częściowy ubytek materiału. Brak rekomendacji do dalszych badań.
AL 6063 anodowanie 5-10 μm		 OK	 OK	 NOK	 NOK	 OK	Na powierzchni płytki pojawił się osad oraz częściowy ubytek materiału. Brak rekomendacji do dalszych badań.

Material	Zdjęcie próbki	Test zanurzeniowy (immersyjny)					Komentarz
		5% Somat	100% Somat	5% Neophos	80% Neophos	STIWA	
AL 6063 anodowanie 15-20 μm		 OK	 OK	 NOK	 NOK	 OK	Na powierzchni płytki pojawił się osad oraz częściowy ubytek materiału. Brak rekomendacji do dalszych badań.
AL + powłoka ceramiczna		 OK	 OK	 NOK	 OK	 OK	Na powierzchni płytki pojawił się osad oraz częściowy ubytek materiału. Brak rekomendacji do dalszych badań.
SSiC (Spiekany węgiel krzemu)		 OK	 OK	 OK	 OK	 OK	Powierzchnia nie zmieniła się. Rekomendacja do dalszych badań.

Uzyskane wyniki stanowią podstawę do dalszej analizy i oceny przydatności materiałów do zastosowań w środowiskach agresywnych chemicznie, typowych dla zmywarek oraz innych urządzeń AGD.

Spośród wszystkich testowanych próbek tylko dwa materiały spełniły założone kryteria odporności i stabilności w warunkach laboratoryjnych: spiekany węgiel krzemu (SSiC) oraz stal nierdzewna (304ST). Pozostałe materiały wykazywały widoczne zmiany w strukturze powierzchni (korozja, osady, degradacja powłoki) i nie zapewniały wymaganej powtarzalności parametrów. SSiC i stal nierdzewna zachowały integralność mechaniczną, nie odnotowano na ich powierzchniach żadnych istotnych uszkodzeń ani osadów, co kwalifikuje je jako jedyne nadające się do dalszych prób i zastosowań w konstrukcji wymienników ciepła.

W trakcie poszukiwań okazało się, że mimo deklarowanej odporności SSiC, nie udało się znaleźć dostawcy zdolnego wyprodukować rurki z węgla krzemu o cienkiej ściance (rzędu 0,25–0,5 mm). Z uwagi na kruchość materiału jedyną dostępną rurką SSiC miała ściankę o grubości 2,25 mm, co istotnie obniża jej efektywną przewodność cieplną (ze względu na dłuższą drogę przewodzenia ciepła). W konsekwencji, w układzie wymiennika montowanym przy bocznej ścianie zmywarki, jedyny praktyczny materiał pozostaje stal nierdzewna (304ST). Natomiast w przypadku wymiennika modułowego istnieje możliwość doboru różnych materiałów dostosowanych do specyficznych warunków pracy oraz środowiska eksploatacji – co pozwala optymalizować zarówno efektywność wymiany cieplnej, jak i trwałość konstrukcji w różnych urządzeniach.

4. Opracowanie innowacyjnych rozwiązań w urządzeniach AGD

Optymalizacja systemów wymiany ciepła w urządzeniach AGD stanowi kluczowy element poprawy efektywności energetycznej i ograniczenia strat energii cieplnej. Tradycyjne zmywarki charakteryzują się znacznymi stratami ciepła generowanego w procesie mycia, które w większości przypadków nie jest odzyskiwane. W odpowiedzi na ten problem, w niniejszym rozdziale omówiono innowacyjne koncepcje wymienników ciepła, których celem jest zwiększenie efektywności energetycznej poprzez odzysk ciepła odpadowego i jego ponowne wykorzystanie w cyklu pracy urządzenia.

Przedstawione rozwiązania obejmują trzy różne typy wymienników ciepła: przeciwbieżny wymiennik ciepła w zmywarkach, wymiennik ciepła w silnikach BLDC (np. w zmywarkach) oraz modułowy wymiennik ciepła. Każde z tych rozwiązań ma na celu maksymalizację odzysku ciepła przy minimalizacji kosztów produkcji i utrzymania urządzenia. W kolejnych podrozdziałach dokonano szczegółowej analizy konstrukcyjnej, materiałowej oraz efektywnościowej poszczególnych typów wymienników ciepła.

4.1. Przeciwbieżny wymiennik ciepła na bocznej ścianie zmywarki

Przeciwbieżny wymiennik ciepła charakteryzuje się konfiguracją, w której gorący strumień wody odpływowej przepływa w przeciwnym kierunku do zimnego strumienia wody napływającej (szczegółowy opis zjawiska znajduje się w podrozdziale 1.2.3). Dzięki temu zachowany jest wysoki gradient temperatur na całej długości wymiennika, co umożliwia efektywniejsze przekazywanie energii cieplnej. Kluczowym aspektem konstrukcji jest odpowiedni dobór materiałów odpornych na korozję, detergenty i wysokie temperatury, co pozwala na długotrwałe użytkowanie w agresywnym środowisku zmywarki.

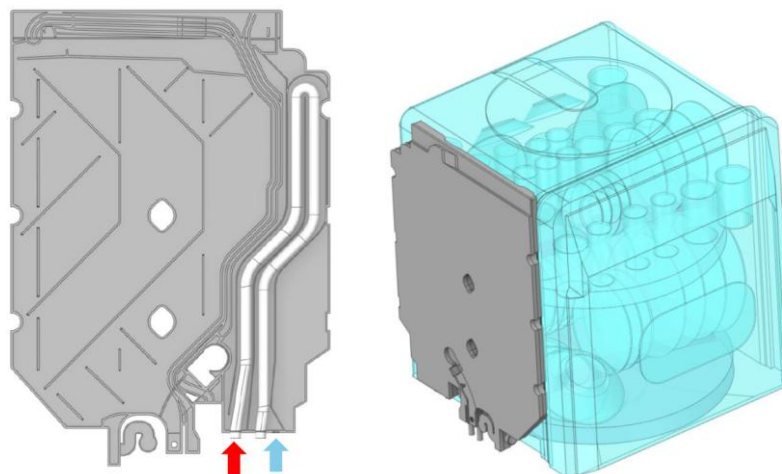
4.1.1. Konstrukcja i zasada działania

Miejszem przeznaczonym do instalacji przeciwbieżnego wymiennika ciepła w zmywarce jest boczna ściana komory zmywania, w obszarze tzw. przerwy powietrznej, której podstawową funkcją jest zapobieganie cofaniu się wody w układzie hydraulicznym. Przerwa powietrzna pełni rolę strefy buforowej, w której znajduje wymiennika ciepła, umożliwiając przepływ wody w sposób przeciwprądowy.

Rozwiązanie to pozwala na odzyskiwanie ciepła z gorącej wody odpływowej, która opuszcza komorę zmywania po zakończonym cyklu mycia. Ciepło to przekazywane jest wodzie zimnej napływającej do urządzenia, co pozwala na podniesienie jej temperatury przed rozpoczęciem kolejnego cyklu mycia. Taki układ przyczynia się do znaczącej redukcji zapotrzebowania na energię elektryczną, która jest standardowo wykorzystywana do podgrzewania wody.

W prezentowanej konstrukcji, na podstawie modelu zastosowanego w zmywarkach wiodącego producenta, wymiennik ciepła jest zintegrowany z panelem bocznym wykonanej z tworzywa sztucznego. Wewnątrz znajduje się kanał o układzie meandrowym, które maksymalizują powierzchnię wymiany ciepła przy zachowaniu kompaktowej konstrukcji.

Na załączonych rysunkach przedstawiono szczegóły konstrukcyjne wymiennika ciepła oraz jego rozmieszczenie w zmywarce. Widoczna jest również struktura kanałów oraz kierunek przepływu wody zimnej i gorącej, co ilustruje zasadę przeciwbieżnego przepływu. Dzięki tej konfiguracji uzyskuje się intensywną wymianę ciepła przy minimalnych stratach ciśnienia, co pozytywnie wpływa na efektywność energetyczną urządzenia. (Rys. 7).



Rysunek 7. Proponowany wymiennik ciepła w zmywarce – model 3D.

4.1.2. Analiza efektywności energetycznej i potencjalnych korzyści

Wprowadzenie przeciwbieżnego wymiennika ciepła może stanowić istotny element optymalizacji energetycznej urządzenia.

Efektywność energetyczna takiego układu jest zależna od kilku kluczowych czynników:

- Różnicy temperatur między wodą odpływową a napływową, co determinuje maksymalny potencjał odzysku ciepła.
- Wielkości powierzchni wymiany ciepła oraz konstrukcji kanałów w układzie meandrowym, która wpływa na intensywność wymiany ciepła.
- Czasu przepływu wody w kanale wymiennika, co decyduje o stopniu ochłodzenia wody odpływowej i podgrzania wody napływowej.
- Oporów przepływu i strat ciśnienia, które mogą wpływać na wydajność hydrauliczną systemu.

Wstępna analiza energetyczna wskazuje, że zastosowanie przeciwbieżnego wymiennika ciepła umożliwia uzyskanie znacznych korzyści w zakresie redukcji zużycia energii elektrycznej. Poprzez odzyskiwanie ciepła ze zużytej wody, teoretycznie możliwe jest zmniejszenie energii potrzebnej do podgrzania wody nawet o 20% w skali jednego cyklu mycia.

Możemy wstępnie przeanalizować analitycznie możliwości takiego rozwiązania, czyli określenie potencjału odzysku ciepła z wody odpływowej (o temperaturze T_{out}) i przekazania go do wody zasilającej (o temperaturze T_{in}) przy uwzględnieniu rzeczywistych ograniczeń hydraulicznych:

Bilans cieplny i współczynnik odzysku

Zakładamy przepływ grawitacyjny wody wodociągowej o natężeniu masowym $\dot{m}$. Rzeczywista moc odzysku ciepła w wymienniku, uwzględniając jego sprawność ε (gdzie $0 \leq \varepsilon \leq 1$, czyli 0% - 100%) wyznaczymy jako:

$$\dot{Q} = \varepsilon \dot{Q}_{max} [W] \quad (5)$$

gdzie $\dot{Q}_{max} = C_{min}(T_{h,in} - T_{c,in})$ jest maksymalną możliwą mocą wymiany (przy założeniu całkowitej zamiany ciepła na stronie o mniejszej pojemności cieplnej) [W], ε opisuje, jaka część tej maksymalnej mocy jest rzeczywiście przekazywana,

$C = \dot{m}c_p$ to pojemność cieplna strumienia [W/K], $C_{min} = \min(C_h, C_t)$ oznacza mniejszą z pojemności obu strumieni. Wartość sprawności ε może być określona na podstawie teorii *effectiveness-NTU* lub przyjęta z danych katalogowych bądź pomiarów eksperymentalnych.

Czynniki ograniczające

- Różnica temperatur (ΔT) pomiędzy płynami: im mniejsze ΔT , tym niższy potencjał odzysku.
- Sprawność przepływu przy ciśnieniu sieciowym: choć mamy stabilne ciśnienie rzędu $\sim 0,3\text{--}0,5$ MPa, to w projektowaniu kanałów należy uwzględnić spadki ciśnienia rzędu $\Delta p \approx 50\text{--}100$ kPa – wartości te są akceptowalne, ale nie powinny przekraczać dopuszczalnych parametrów armatury (zawory, uszczelki).
- Powierzchnia i geometria kanałów: układ meandrowy wydłuża czas kontaktu i może wywoływać lokalne turbulencje (podnosząc czas h), ale zwiększa też straty ciśnienia. Trzeba zadbać o kompromis między maksymalną powierzchnią wymiany a dopuszczalnym Δp .

Wstępne wyniki estymacji

Przy typowych parametrach cyklu (odpływ wody $T_{out} = 55$ °C, zasilania $T_{in} = 15$ °C, $\dot{m} = 2,5$ l/min ($\approx 0,0417$ kg/s), $\varepsilon = 0,7$) otrzymujemy:

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p(T_{out} - T_{in})\varepsilon = 0,0417 \cdot 4184 \cdot 40 \cdot 0,7 \approx 4,88 \text{ kW}$$

Zakładając, że czas wymiany trwa $t_{wymiany} = 120$ s, moc grzałki $P_{grzałki} = 2$ kW, cykl zmywania $t_{cykl} = 0,5$ h, oraz że do wymiany dochodzi trzy razy podczas cyklu $n = 3$,

to zużycie energii przez grzałkę wynosi:

$$E_{grzałki} = P_{grzałki} \cdot t_{cykl} = 2 \cdot 0,5 = 1000 \text{ Wh},$$

zużycie energii dla jednej wymiany ciepła:

$$E_1 = \dot{Q} \cdot t_{wymiany} = 4,88 \text{ kW} \cdot \frac{120 \text{ s}}{3600 \frac{\text{s}}{\text{h}}} \approx 0,1627 \text{ kWh} = 162,7 \text{ Wh},$$

zużycie energii dla trzech wymian ciepła:

$$E_{total} = n \cdot E_1 = 3 \cdot 162,7 = 488,1 \text{ Wh}$$

procentowa oszczędność energii dla całego cyklu zmywania:

$$\frac{n \cdot E_{total}}{E_{grzałki}} \cdot 100\% = \frac{3 \cdot 162,7}{1000} \approx 48,8\%$$

Jeżeli porównujemy energię wyrażoną w Wh (np. Wh/cykl) z mocą wyrażoną w W, należy zastosować konwersję zależnie od czasu:

$$1 \text{ Wh} = 3600 \text{ J}$$

$$P [\text{W}] = E [\text{Wh}] \cdot 3600 [\text{s/h}] / t [\text{s}]$$

$$E [\text{Wh}] = P [\text{W}] \cdot t [\text{s}] / 3600 [\text{s/h}]$$

Dla cyklu mycia o czasie trwania 30 min i mocy grzałki 2 kW oznacza to potencjalne ograniczenie zużycia energii grzewczej nawet o 48,8 %.

Potencjalne korzyści i ryzyka

Zmniejszenie zużycia prądu grzałki, obniżenie generacji ciepła wewnątrz urządzenia, mniejsze obciążenie instalacji elektrycznej.

Zmienne warunki grawitacyjne wpływające na $\dot{m}$, możliwość powstawania kamienia i korozji w kanałach, spadki sprawności w długim okresie eksploatacji.

W kolejnych rozdziałach przedstawione zostaną wyniki badań numerycznych oraz laboratoryjnych, które pozwolą zweryfikować powyższe założenia.

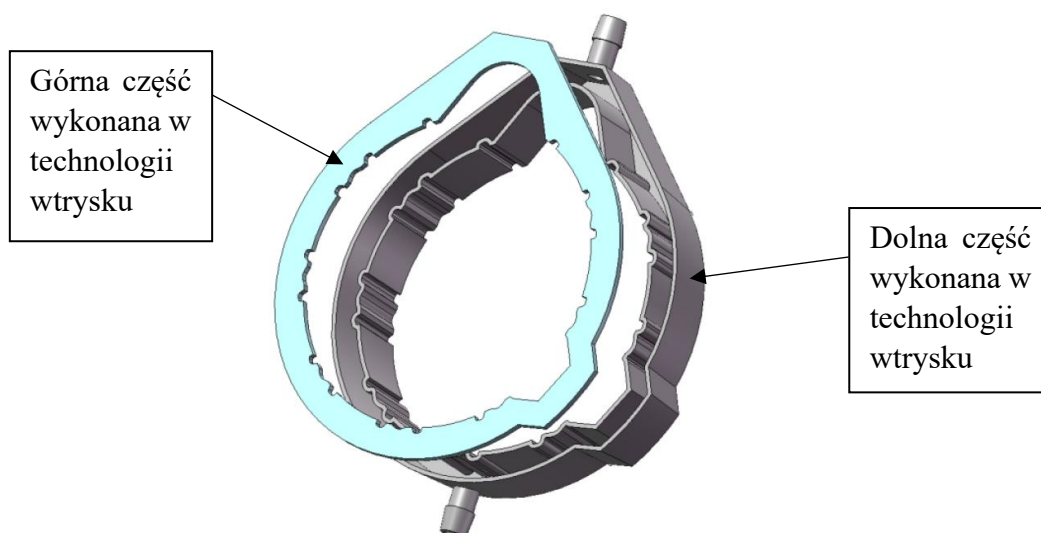
4.2. Wymiennik ciepła w silniku BLDC

Zintegrowanie wymiennika ciepła z silnikiem BLDC stanowi innowacyjne podejście do optymalizacji zarządzania ciepłem. Wprowadzenie takiego wymiennika pozwala na chłodzenie silnika podczas pracy. Rozwiązanie to przyczynia się do zmniejszenia zużycia energii, poprawy sprawności urządzenia oraz wydłużenia żywotności silnika. Szczegółowa analiza efektywności tego rozwiązania zostanie przeprowadzona w rozdziale 5 przy użyciu badań numerycznych oraz laboratoryjnych. Badania były przeprowadzane na silniku BLDC o mocy nominalnej 80 W używanych w pompach do zmywarek.

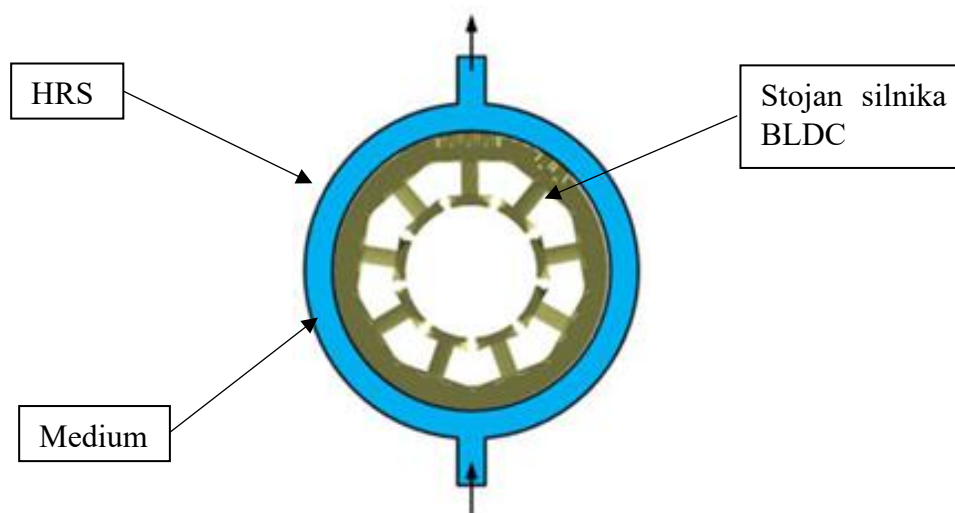
4.2.1. Konstrukcja i integracja z układem silnika

Wymiennik ciepła, zintegrowany z silnikiem BLDC, zaprojektowano jako tzw. system odzysku ciepła (Heat Recovery System – HRS) (Rys. 8), starannie zaprojektowany tak, aby ściśle pasował do stojana silnika. Jest to najbardziej nieinwazyjne, a jednocześnie najbliższe źródło ciepła w pompie. Konstrukcja tego systemu składa się z modułu

chłodzenia cieczą, otaczającego stojan silnika i zapewniającego równomierne rozprzodanie ciepła do cieczy chłodzącej (Rys. 9). Dzięki tej konfiguracji, nadmiar ciepła generowany przez uzwojenia stojanu może zostać efektywnie przekazany do przepływającej cieczy, co pozwala na zmniejszenie temperatury silnika i odzysk ciepła.



Rysunek 8. Model 3D proponowanego wymiennika ciepła - HRS

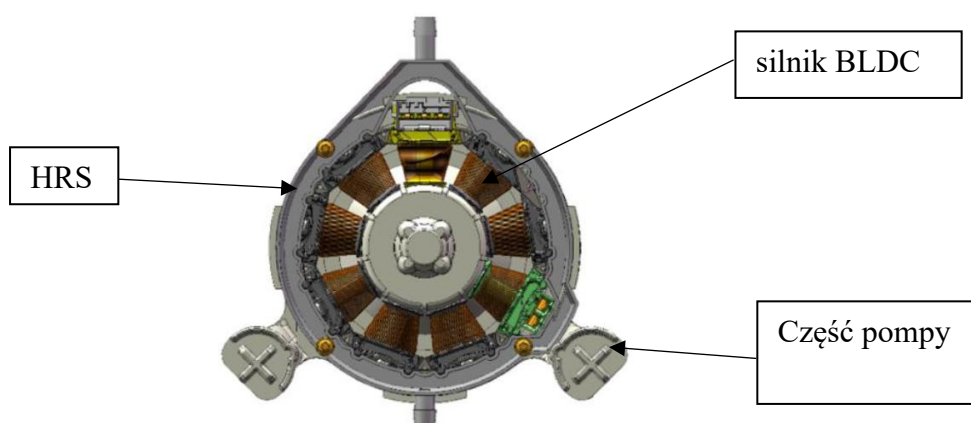


Rysunek 9. Uproszczony schemat wymiennika ciepła HRS.

Wybór materiałów dla tego krytycznego elementu ma kluczowe znaczenie. Innowacyjna konstrukcja i ścieżki przepływu w wymienniku ciepła dodatkowo optymalizują wymianę ciepła, maksymalizując wydajność. Jednak historia materiałów wykracza poza sam wymiennik ciepła. Sam silnik BLDC i pompa hydrauliczna są starannie

dobierane ze względu na moc znamionową, zakres prędkości i właściwości termiczne silnika oraz rodzaj użytej pompy. Wszelkie obróbki powierzchni lub powłoki stosowane w celu zwiększenia wydajności lub trwałości są również starannie rozważane.

Połączenie wszystkiego razem to proces produkcji i integracji. Niezależnie od tego, czy jest to obróbka skrawaniem, spawanie, lutowanie, czy nawet wytwarzanie przyrostowe (druk 3D), wybrane metody zapewniają integrację wymiennika ciepła z silnikiem (Rys. 10)



Rysunek 10. Model 3D silnika BLDC z HRS.

4.2.2. Mechanizm chłodzenia silnika w systemie HRS

System HRS jest skonfigurowany do bezpośredniego odprowadzania ciepła z stojana silnika pompy przy wykorzystaniu wody wodociągowej przepływającej grawitacyjnie przez moduł chłodzący. Woda wpływa do kanałów w obudowie HRS (wykonanego z tworzywa sztucznego o $\lambda \approx 0,2\text{--}0,3 \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$), skąd grawitacyjnie odbiera ciepło z lameli stojana. Odbiór ciepła zachodzi poprzez przewodzenie w ściankach wtryskowej obudowy (grubość ścianki ok. 1 mm) do biegnącej tuż przy nich cieczy. Całkowity opór cieplny przedstawia się jako sumę oporów przewodzenia przez ściankę (o grubości t i przewodności λ) i oporu konwekcyjnego po stronie cieczy (h przy powierzchni A):

$$R_{th} = \sum_i \frac{t_i}{\lambda_i \cdot A} + \frac{1}{h \cdot A} \left[\frac{K}{W} \right] \quad (6)$$

gdzie R_{th} to całkowity opór cieplny [K/W], A - efektywna (zwilżona) powierzchnia wymiany [m²], t_i - grubość i-tej warstwy ścianki [m], λ_i - przewodność cieplna i-tej warstwy [W/(m·K)], h - współczynnik przejmowania ciepła [W/(m²·K)].

Współczynnik przejmowania ciepła h oblicza się z zależności:

$$h = \frac{Nu \cdot k_{wody}}{D_h} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right] \quad (7)$$

gdzie Nu to liczba Nusselta (zależna od charakteru przepływu i długości rozwijania warstwy termicznej), k_{wody} - przewodność cieplna wody [W/(m·K)], a D_h to hydrauliczna średnica przekroju kanału [m].

Dla małych prostokątnych przekrojów oraz przepływów w rejonie laminarnym praktyczne, konserwatywne wartości Nu mieszczą się w przedziale $\approx 3,66$ – $4,36$ (odpowiednio dla warunku ściana o stałej temperaturze lub stałym strumieniu ciepła w klasycznym ujęciu inżynierskim), co dla $D_h \approx 3,0$ mm i $k_{wody} \approx 0,6$ [W/(m·K)] daje h rzędu około 730 – 870 [W/(m²·K)]. Natomiast R_{th} wynosi $\approx 0,182$ – $0,190$ K/W.

Przyjmując moc pobieraną silnika $P_{in} = 80$ W i zakładając sprawność $\eta_{motor} = 60$ – 70% straty cieplne silnika wynoszą $P_{straty} = P_{in} \cdot (1 - \eta_{motor}) \approx 24$ – 32 W. W warunkach braku aktywnego chłodzenia symulacje wykazały temperatury stojana do ~ 140 °C, co jest zgodne z maksymalnym dopuszczalnym przyrostem temperatury dla klasy izolacji F.

Zgodnie z normą EN 60335-1, dla klasy izolacji F, maksymalny dopuszczalny przyrost temperatury wynosi 115 °C, co przy temperaturze początkowej 25 °C daje właśnie 140 °C jako graniczną wartość dopuszczalną pracy silnika. Testowany silnik osiągał tę wartość w warunkach braku chłodzenia, co może prowadzić do pogorszenia właściwości materiałowych izolacji uzwojeń oraz trwałości magnesów.

Typowy zakres optymalnej pracy silników BLDC to 60–80 °C, co zapewnia wysoką sprawność i długą żywotność komponentów, takich jak łożyska, magnesy trwałe (np. neodymowe) czy elektronika. Temperatura przekraczająca 100 °C może prowadzić do utraty właściwości magnetycznych oraz degradacji materiałowej.

Aby obniżyć temperaturę pracy silnika i zwiększyć jego niezawodność, zastosowano wymiennik ciepła wokół stojana, oparty na chłodzeniu wodnym. Dzięki znacznie wyższej przewodności cieplnej cieczy w porównaniu z powietrzem, system ten umożliwił

skuteczniejsze odprowadzenie ciepła z uzwojeń silnika. W warunkach testowych, temperatura silnika została obniżona do około 100 °C, co oznacza redukcję o ok. 40 °C, wpływając korzystnie zarówno na wydajność, jak i trwałość napędu pompy.

Optymalizacja układu obejmuje wymiarowanie kształtu kanałów oraz minimalizację oporów przepływu ($\Delta p \approx 5\text{--}15$ kPa), co jest kluczowe przy grawitacyjnym zasilaniu. Kontrola temperatury może być realizowana za pomocą termistora NTC w punktach wylotu wody, co umożliwia adaptacyjne sterowanie zaworem napełniającym wody i regulację czasu otwarcia dopływu w kolejnych cyklach pracy.

4.2.3. Wpływ na sprawność energetyczną i chłodzenie silnika

Integracja HRS z silnikiem BLDC przynosi korzyści zarówno w zakresie poprawy sprawności energetycznej zmywarki, jak i przypuszczalnie możliwe wydłużenie trwałości samego silnika [125-128]. Stałe chłodzenie pozwala na utrzymanie jego temperatury w optymalnym zakresie 60–80 °C, co minimalizuje straty związane z prądami wirowymi i zjawiskiem histerezy w rdzeniu silnika. Utrzymanie temperatury silnika na optymalnym poziomie pozwala również na redukcję uszkodzeń termicznych, które mogłyby prowadzić do awarii.

Wartość odzyskiwanego ciepła zależy od ilości energii wytwarzanej przez silnik podczas pracy. W literaturze wskazuje się, że wykorzystanie cieczy jako medium chłodzącego może prowadzić do znacznie większej przewodności cieplnej oraz stabilniejszej regulacji temperatury niż tradycyjne chłodzenie powietrzem [129].

Sprawność η odzysku z silnika z HRS zdefiniowano jako:

$$\eta_{HRS} = \frac{\dot{Q}_{odzysk}}{\dot{Q}_{straty_silnik}} \quad (8)$$

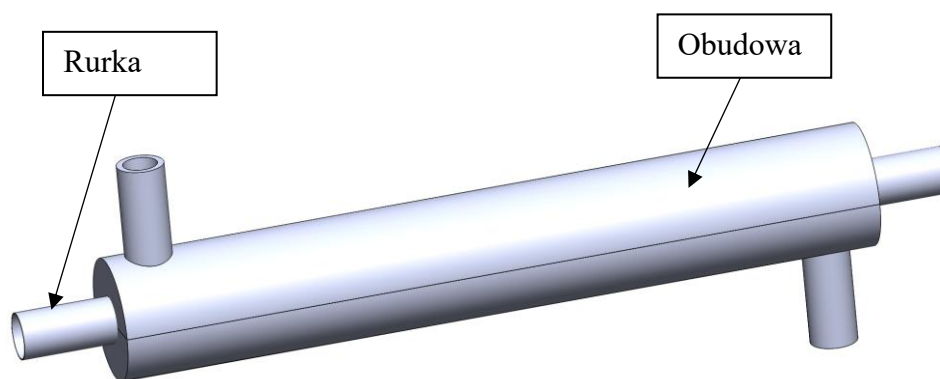
gdzie $\dot{Q}_{odzysk}$ to moc fizyczna odebrana ze stojanu silnika i przekazana do obiegu grzewczego [W], a $\dot{Q}_{straty_silnik}$ to całkowite straty ciepłe napędu w warunkach pracy [W].

Przy odpowiednich parametrach przepływu masowego oraz właściwości cieplnych medium chłodzącego (najczęściej woda o wysokiej pojemności cieplnej), wymiennik HRS pozwala na znaczne zmniejszenie ilości energii zużywanej na utrzymanie optymalnej temperatury silnika.

System chłodzenia silnika HRS spełnia wymagania normy EN 60335-1, która reguluje bezpieczeństwo elektryczne i termiczne urządzeń AGD. Norma ta określa, że silniki stosowane w zmywarkach muszą działać w bezpiecznym zakresie temperatur, co jest zapewnione dzięki zastosowaniu proponowanego systemu chłodzenia cieczą, które stabilizuje temperaturę pracy silnika i minimalizuje ryzyko przegrzania nawet przy intensywnych cyklach mycia.

4.3. Modułowy wymiennik ciepła

Modułowy wymiennik ciepła (Rys. 11), dzięki swojej konstrukcji, umożliwia elastyczne dostosowanie wymiarów oraz łatwą adaptację do różnych urządzeń AGD, takich jak zmywarki czy pralki. Choć rozwiązanie to oferuje znaczną wszechstronność i prostotę integracji, wiąże się także z pewnymi wyzwaniami, które mogą ograniczać jego efektywność oraz trwałość.



Rysunek 11. Model 3D modułowego wymiennika ciepła.

Wyzwania techniczne

1. Optymalizacja wymiarów modułowych komponentów.

Modułowa konstrukcja wymiennika pozwala na dostosowanie jego długości i średnicy do specyfiki urządzenia, jednakże różne aplikacje wymagają

precyzyjnego dopasowania wymiarów, aby osiągnąć wysoką efektywność wymiany ciepła. Każda zmiana parametrów wymiennika (np. długości aluminiowej rurki) może wymagać indywidualnych testów wydajności, co wydłuża czas projektowania i może zwiększać koszty produkcji.

2. Odporność na warunki pracy w różnych urządzeniach.

Modułowy wymiennik ciepła musi być odporny na specyficzne warunki pracy w zmywarkach i pralkach, w tym na duże różnice temperatur, wysokie ciśnienie oraz wpływ detergentów i wilgoci. Zapewnienie odpowiedniej wytrzymałości konstrukcyjnej i odporności chemicznej wszystkich komponentów modułowych (np. plastikowej obudowy i aluminiowej rurki) może wymagać zastosowania zaawansowanych materiałów, co wpływa na koszty.

Wyzwania ekonomiczne i produkcyjne

1. Koszt produkcji i możliwość recyklingu materiałów.

Ze względu na zastosowanie zarówno metalu, jak i tworzyw sztucznych, modułowe wymienniki ciepła mogą wymagać bardziej skomplikowanych procesów produkcyjnych i montażowych. Zastosowanie różnych materiałów oznacza również konieczność rozważenia możliwości ich recyklingu, co może stanowić dodatkowy wydatek związany z utylizacją lub recyklingiem. Warto więc poszukiwać materiałów i technologii produkcyjnych, które z jednej strony pozwolą na obniżenie kosztów, a z drugiej będą zgodne z polityką zrównoważonego rozwoju.

2. Kompatybilność i elastyczność konstrukcyjna.

Choć modułowy wymiennik ciepła jest elastyczny i łatwo adaptowalny, jego wdrożenie w różnych modelach urządzeń wymaga przemyślanej konstrukcji, która zapewni kompatybilność z istniejącymi komponentami. Zastosowanie modułów wymaga również opracowania znormalizowanych rozmiarów, co ułatwi montaż oraz serwisowanie, ale może ograniczyć optymalizację wymiany ciepła dla specyficznych zastosowań.

Możliwe strategie rozwoju modułowego wymiennika ciepła

Aby przezwyciężyć wyzwania modułowego wymiennika ciepła, proponuje się:

- Rozwój znormalizowanych modułów – co pozwoli na szerokie zastosowanie wymienników bez konieczności indywidualnego dostosowywania do każdego modelu zmywarki lub pralki.

- Zastosowanie materiałów o wysokiej przewodności cieplnej i wytrzymałości na korozję – umożliwi to zwiększenie efektywności wymiany ciepła przy jednoczesnym wydłużeniu żywotności wymiennika.
- Wprowadzenie innowacyjnych technologii produkcji – takich jak formowanie wtryskowe tworzyw o podwyższonej przewodności cieplnej, co mogłoby obniżyć koszty produkcji i poprawić jednorodność strukturalną wymiennika.

Podsumowując, modułowy wymiennik ciepła oferuje znaczący potencjał w zakresie efektywności energetycznej i elastyczności konstrukcyjnej, jednak jego pełne wdrożenie wymaga pokonania wielu wyzwań związanych z dopasowaniem technologicznym i optymalizacją kosztową. Dalsze badania nad konstrukcją modułową mogą przyczynić się do opracowania uniwersalnych wymienników o wysokiej wydajności, co zrewolucjonizowałoby rynek urządzeń AGD. Szczegółowa analiza efektywności tego rozwiązania zostanie przeprowadzona w rozdziale 5 przy użyciu badań numerycznych oraz laboratoryjnych.

4.3.1. Charakterystyka konstrukcji modułowego wymiennika

Modułowy wymiennik ciepła składa się z obudowy złożonej z dwóch symetrycznych elementów formowanych wtryskowo. Taka konstrukcja niesie istotną zaletę produkcyjną – zastosowanie jednej formy wtryskowej do obu połówek pozwala obniżyć koszty wytwarzania i uprościć logistykę. Wnętrze obudowy wyposażone jest w prowadzące przepływ żeberka, których rozmieszczenie i geometria sprzyjają wytwarzaniu lokalnych turbulencji. Dzięki temu poprawia się intensywność wymiany ciepła pomiędzy strumieniami płynów.

W centralnej osi modułu znajduje się rurka wykonana z materiału o wysokim przewodnictwie cieplnym, pełniąca funkcję głównego kanału wymiany ciepła. Kluczowym etapem montażu jest szczelne i trwałe połączenie tej rurki z obudową. Stosuje się w tym celu metody łączenia termicznego, np. zgrzewanie tarciove lub łączenie na gorąco.

W tej drugiej metodzie rurka jest kontrolowanie nagrzewana (np. indukcyjnie lub grzałką), aż do momentu, gdy jej powierzchnia osiąga temperaturę wystarczającą do miejscowego uplastycznienia tworzywa obudowy w strefie kontaktu. Po wciśnięciu nagrzanej rurki w gniazdo obudowy następuje jej punktowe nadtopienie i zespolenie obu

elementów. Po schłodzeniu powstaje jednorodne, szczelne połączenie mechaniczno-termiczne, odporne na ciśnienie i zmienne temperatury pracy.

W trakcie eksploatacji ciepła ciecz przepływa wewnątrz aluminiowej rurki, natomiast zimna woda zasilająca przepływa kanałem utworzonym pomiędzy ścianką rurki a wewnętrzną powierzchnią obudowy. Dzięki ułożeniu obu strumieni w układzie przeciwbieżnym utrzymywany jest maksymalny gradient temperatur na całej długości modułu. Żebra umieszczone wewnątrz kanału zewnętrznego wprowadzają przepływ w stan kontrolowanej turbulencji, co skutkuje cienką, niespokojną warstwą przyścienną i znacznie zwiększa współczynnik konwekcji po stronie zimnej cieczy. Ciepła woda przekazuje swoje ciepło przez cienką ściankę rurki, natomiast obudowa modułu dzięki dobrej przewodności aluminiowej rurki tylko minimalnie ogranicza transfer. W efekcie moduł osiąga wysoką efektywność wymiany, przy stosunkowo niskich stratach ciśnienia. Wersja modułowa pozwala na łączenie kolejnych segmentów równolegle bądź szeregowo, co umożliwia dostosowanie zarówno natężenia przepływu, jak i wymaganej różnicy temperatur. W celu zachowania optymalnych warunków termicznych każdy moduł może być wyposażony w indywidualnie dobraną liczbę żeber oraz regulację odległości między nimi, co pozwala sterować intensywnością mieszania i spadkiem ciśnienia w zależności od specyfiki aplikacji.

Całość konstrukcji przewidziana jest jako system modułowy – poszczególne segmenty mogą być łączone szeregowo, co pozwala łatwo dopasować długość wymiennika do wymagań konkretnego urządzenia AGD.

Materiały i wykonanie

- obudowa – wykonana np. z polipropylenu HF-FR (halogen free, flame retardant), odpornego na korozję i wysokie temperatury, odpornego na agresywne środowisko chemiczne;
- rurka wewnętrzna – aluminium AL6063 poddane procesowi anodowania (warstwa 5–20 μm), co zwiększa odporność na korozję i poprawia wymianę ciepłą;
- złącza hydrauliczne – standardowe końcówki $\frac{1}{2}$ ", umożliwiające łatwe wpięcie do instalacji AGD oraz szybkie odłączanie w trakcie serwisu.

Elementy zwiększające efektywność transferu ciepła

- żebra – wymuszają turbulencję i wydłużają czas kontaktu cieczy ze ścianką wymiennika;

- minimalna grubość ścianki – ścianka rurki o grubości 0,25 mm dla minimalizacji oporu przewodzenia, przy jednoczesnym zachowaniu wytrzymałości mechanicznej;
- modularność – możliwość łączenia dowolnej liczby segmentów w zależności od przestrzeni montażowej i wymaganego stopnia odzysku ciepła.

Zalety konstrukcyjne

- Elastyczność adaptacji do różnych konfiguracji urządzeń AGD (zmywarki, pralki, podgrzewacze).
- Łatwość montażu i demontażu – moduły na wcisk, bez użycia narzędzi specjalnych.
- Możliwość szybkiej wymiany pojedynczych segmentów w razie uszkodzenia lub zużycia.
- Niskie koszty produkcji dzięki wykorzystaniu tworzyw sztucznych do obudowy i standaryzowanym rurkom aluminiowym.

4.3.2. Analiza wydajności energetycznej i potencjalne zastosowania w AGD

Aby ocenić, jak modułowy wymiennik ciepła sprawdzi się w rzeczywistych warunkach eksploatacji w sprzęcie AGD, rozpoczynamy od teoretycznego oszacowania jego zdolności do transferu energii. W dalszej części pracy porównamy te wyniki z danymi uzyskanymi w badaniach laboratoryjnych.

W celu teoretycznego określenia uzysku cieplnego oraz temperatur wylotowych w wymienniku przeciwprądowym, przeprowadzono szereg obliczeń bazując na znanych parametrach geometrycznych wymiennika oraz właściwościach termofizycznych płynu.

Pierwszym krokiem jest ustalenie strumienia masy ($\dot{m}$) oraz powierzchni wymiany ciepła (A). Przyjmując gęstość wody (ρ) wynoszącą 997 [kg/m³] oraz przepływ objętościowy ($\dot{V}$) 4×10^{-5} [$\frac{m^3}{s}$], strumień masy wynosi:

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{V} = 0,039880 \left[\frac{kg}{s}\right].$$

Następnie znając średnicę rurki ($d_m = 0,01975$ m) oraz długość ($L = 0,24$ m), powierzchnię wymiany ciepła obliczamy jako powierzchnię boczną cylindra:

$$A = \pi \cdot d_m \cdot L = 0,014891 [m^2].$$

Do dalszych obliczeń niezbędne jest wyznaczenie liczby jednostek transferowych NTU (Number of Transfer Units) oraz stosunku pojemności cieplnej (C_r). Zakładając ciepło właściwe wody (c_p) na poziomie 4180 [J/(kg·K)] oraz całkowity współczynnik przenikania ciepła (U) wynoszący 800 [W/(m²·K)] (wartość typowa dla kontaktu ciecz-metal-ciecz w cienkościennej rurce ze stali nierdzewnej 304ST) [124], obliczamy minimalną pojemność cieplną (C_{min}) jako iloczyn strumienia masy i ciepła właściwego:

$$C_{min} = \dot{m} \cdot c_p = 166,7 \left[\frac{W}{K} \right].$$

NTU jest zdefiniowany jako $NTU = \frac{U \cdot A}{C_{min}} = 0,07146$.

Ponieważ przepływy objętościowe i właściwości termofizyczne obu strumieni wody są identyczne, pojemności cieplne obu strumieni są równe ($C_{min} = C_{max}$). W konsekwencji, stosunek pojemności cieplnych (C_r) wynosi 1. Dla wymiennika przeciwprądowego, w przypadku, gdy $C_r = 1$, sprawność (ε) może być obliczona z uproszczonego wzoru:

$$\varepsilon = \frac{NTU}{1+NTU} = 0,067, \text{ czyli } 6,7\%.$$

Mając sprawność wymiennika oraz temperatury wlotowe ciepłej ($T_{h,in} = 55 \text{ }^\circ\text{C}$) i zimnej ($T_{c,in} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$) wody, możemy określić temperatury wylotowe ($T_{c,out}$ i $T_{h,out}$). Zakładając, że $T_{h,in} - T_{c,in} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$, stosujemy następującą zależność:

$$T_{c,out} = T_{c,in} + \varepsilon \cdot (T_{h,in} - T_{c,in}) \text{ oraz}$$

$$T_{h,out} = T_{h,in} - \varepsilon \cdot (T_{h,in} - T_{c,in}).$$

Temperatura wylotowa ciepłej wody wynosi 52,33 °C a zimnej 17,67 °C. Ostatecznie, teoretyczny uzysk cieplny ($\dot{Q}$) wymiennika obliczamy, wykorzystując sprawność, minimalną pojemność cieplną oraz maksymalną teoretyczną różnicę temperatur:

$$\dot{Q} = \varepsilon \cdot C_{min} \cdot (T_{h,in} - T_{c,in}) = 444,73 \text{ W}.$$

Powyższe wartości stanowią punkt odniesienia do porównań z wynikami z testu laboratoryjnego: różnice między przewidywaną a zmierzoną wielkością $\dot{Q}$ pozwolą oszacować błąd modelu oraz wskazać ewentualne straty ciepła lub efekty nieliniowe pominięte w uproszczonym opisie.

Potencjalne zastosowania w AGD

- Odzysk ciepła w zmywarkach: moduł może podgrzewać wodę wstępną, wykorzystując ciepło wody odpływowej, co zmniejsza zużycie energii do nagrzewania świeżej wody.

- Pralki z systemem Eco – odzysk ciepła z wody po praniu lub płukaniu, przekazując je wodzie dolotowej do cyklu wstępnego.
- Podgrzewacze pojemnościowe i przepływowe – zwiększenie sprawności poprzez dodatkowy stopień wymiany ciepła między zasilaniem zimnej wody a obiegiem wtórnym.

4.3.3. Wpływ na efektywność energetyczną w różnych urządzeniach

W tej sekcji omówiono, jak wdrożenie modułowego wymiennika ciepła przekłada się na przypuszczalne oszczędności energii i poprawę efektywności w trzech wybranych typach urządzeń AGD.

1. Zmywarki do naczyń

- Scenariusz działania

Szczegółowy scenariusz działania został opisany w rozdziale 4.3.1.

Parametry dla tego scenariusza: woda wypływająca po cyklu płukania ($T_h = 55^\circ\text{C}$) trafia przez wymiennik i podgrzewa wodę zasilającą ($T_c = 15^\circ\text{C}$).

- Parametry odzysku ciepła

Na podstawie modelu NTU- ϵ (współczynnik efektywności $\epsilon \approx 6,8\%$) uzyskano wzrost temperatury wody zasilającej do ok. $17,7^\circ\text{C}$, czyli uzysk cieplny $\sim 2,7$ K. Dla standardowego przepływu 2,5 l/min daje to uzysk mocy ok. 0,47 kW, a oszczędność energii na cykl zmywania wynosi $\sim 0,08\text{kWh}$.

- Korzyści

- Redukcja zużycia energii grzewczej o 5–10% w przeciętnym cyklu zmywania.
- Skrócenie czasu nagrzewania wody do zadanej temperatury.

2. Pralki automatyczne

- Scenariusz działania

Woda po etapie wstępnego płukania (pre-wash) o temp. $T_h = 50^\circ\text{C}$ kierowana jest przez wymiennik, aby podgrzać wodę do cyklu głównego ($T_c = 30^\circ\text{C}$).

- Parametry odzysku ciepła

Dla przepływu ~ 10 l/min i $\Delta T \approx 20^\circ\text{K}$ zysk mocy wynosi ok. 1,39 kW, a oszczędność energii w czasie działania wymiennika (1 min) wynosi $\sim 0,7$ kWh na pełny cykl prania. Oszacowane odzyski ciepła sięgają 350–400 W, co przekłada się na oszczędność około 0,7 kWh na jednym pełnym cyklu prania.

- Korzyści
 - Zmniejszenie czasu nagrzewania wody grzałką o 20–30%.
 - Niższe zużycie prądu i redukcja kosztów eksploatacyjnych.

Podsumowując, modułowy wymiennik ciepła, dzięki swojej elastycznej, segmentowej konstrukcji i wydajnemu transferowi ciepła w układzie przeciwprądowym, oferuje wymierne korzyści energetyczne w wielu aplikacjach AGD. Szacowane oszczędności przy pojedynczych cyklach urządzeń wahają się od 0,4 do 0,9 kWh, co w skali rocznej może oznaczać redukcję zużycia energii nawet o kilkadziesiąt procent, w zależności od intensywności użytkowania.

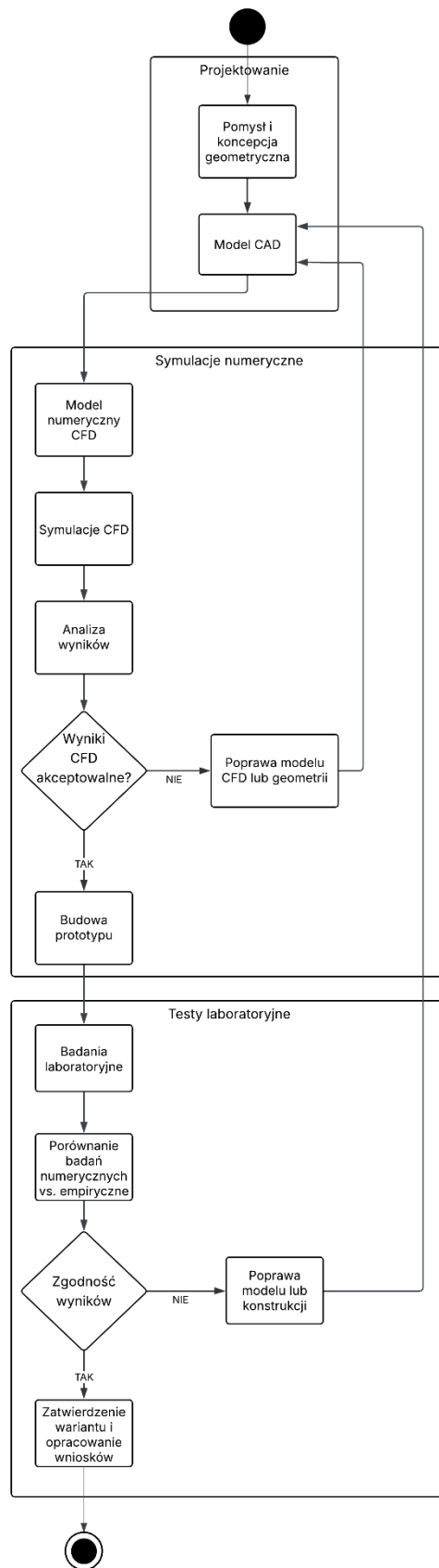
5. Metodyka

W celu przeprowadzenia kompleksowej oceny efektywności energetycznej innowacyjnych wymienników ciepła zastosowano dwutorowe podejście badawcze, obejmujące badania symulacyjne oraz badania laboratoryjne. Analiza numeryczna metodą obliczeniowej mechaniki płynów (CFD) pozwala na ocenę parametrów termicznych i przepływowych w różnych konfiguracjach wymienników bez konieczności budowy fizycznych prototypów. Z kolei badania laboratoryjne umożliwiają weryfikację wyników symulacyjnych oraz ocenę rzeczywistego wpływu czynników zewnętrznych, takich jak uwarunkowania materiałowe czy zmienne warunki eksploatacyjne (Rys. 12).

W ramach badań numerycznych zastosowano modelowanie komputerowe w oparciu o metodę elementów skończonych, pozwalającą na analizę przepływu ciepła i dynamiki płynów w obrębie konstrukcji wymienników. Symulacje obejmowały analizę rozkładu temperatur, strat ciśnienia oraz wpływu geometrii wymiennika na jego sprawność.

Badania laboratoryjne przeprowadzono na specjalnie przygotowanych stanowiskach testowych, umożliwiających ocenę efektywności wymiany ciepła w warunkach rzeczywistej pracy urządzenia. Testy obejmowały pomiary temperatury, przepływu oraz różnicy ciśnień, pozwalając na ocenę skuteczności odzysku energii cieplnej i zgodność wyników z modelami numerycznymi.

Rozdział ten opisuje szczegółowo zarówno założenia i narzędzia modelowania CFD, jak i metodykę badań laboratoryjnych, przybliżając kluczowe parametry testowanych układów oraz procedury analizy wyników.



Rysunek 12. Schemat metodyki badań.

5.1. Badania numeryczne

Współczesne badania nad optymalizacją wymienników ciepła coraz częściej wykorzystują metody numeryczne, które pozwalają na szczegółową analizę zjawisk zachodzących w układach przepływowych. Badania numeryczne, a w szczególności CFD, umożliwiają precyzyjne modelowanie transferu ciepła, dynamiki płynów oraz oddziaływań termodynamicznych w warunkach rzeczywistej eksploatacji. Ich zaletą jest możliwość przeprowadzenia wielowariantowych analiz konstrukcyjnych bez konieczności kosztownych i czasochłonnych testów laboratoryjnych.

W niniejszej pracy przeprowadzono kompleksowe badania numeryczne z zastosowaniem metody CFD w celu oceny wydajności trzech odmiennych konfiguracji wymienników ciepła dla urządzeń AGD. Analiza została wykonana przy użyciu zaawansowanego oprogramowania (ANSYS Fluent/SolidWorks), z uwzględnieniem pełnego modelu termofluidalnego: turbulentnego przepływu, transferu konwekcyjno-kondukcyjnego oraz wymiany ciepła. Szczegółowe ustawienia parametrów symulacji zostały opisane osobno dla każdego badania. Dla każdego wariantu wymiennika zdefiniowano warunki brzegowe (temperatury i strumienie masowe czynnika chłodniczego oraz powietrza), a siatki obliczeniowe poddano testom niezależności od zagęszczenia, aby wyeliminować wpływ dyskretyzacji na wyniki.

W celu ilościowego określenia wpływu zagęszczenia siatki na wyniki przeprowadzono studium zbieżności siatki polegające na analizie trzech poziomów dyskretyzacji (siatki „coarse”, „medium”, „fine”). Jako kryterium akceptowalnej zbieżności przyjęto zmianę kluczowego wyniku (strumienia cieplnego $\dot{Q}$) mniejszą niż 1% między siatką referencyjną a siatką o wyższym zagęszczeniu oraz zachowanie wymaganej jakości siatki (minimalna jakość ortogonalna) i odpowiednich wartości y^+ w strefie przyściennej w zależności od przyjętego modelu turbulencji. Dla wariantu HRS, ze względów geometrycznych i wymaganej dokładności w obszarach przyściennych, wykorzystano siatkę pryzmatyczną z niskimi wartościami y^+ ; dla innych wariantów monitorowano y^+ oraz minimalną jakość ortogonalną komórek zgodnie z przyjętymi kryteriami modelowania. Wyniki studium (Tabela 12) przedstawiają zależność wybranego parametru jakościowego (np. $\dot{Q}$) od zagęszczenia siatki oraz uzasadniają wybór siatki referencyjnej zastosowanej w dalszych symulacjach. (Parametry siatki i przyjęte kryteria oparto na opisach siatek i warstwy przyściennej zastosowanych w obliczeniach).

Tabela 12. Studium zbieżności siatki

Siatka/wariant	Liczba komórek	Minimalna jakość ortogonalna	Zakres y^+ (przyścienna)
S1 - coarse	0,5 M	0,12	30-300
S2 - medium	2 M	0,16	10-100
S3 – fine (referencja dla bocznej ściany)	4 588 633	0,16	1-20 (inflation)
Wariant HRS	43 452	0,2	Lokalnie $y^+ < 1$
Wariant modułowy	2 458 995	0,15	1-20 (inflation)

Uzyskane wyniki (rozkład pola prędkości, temperatur, profilu strat ciśnienia oraz wskaźników sprawności cieplnej) zostały zestawione i porównane ze sobą, a następnie zweryfikowane w badaniach laboratoryjnych przeprowadzonych na przygotowanym stanowisku testowym. Dzięki temu możliwe było bezpośrednie zestawienie wyników symulacji CFD z danymi pomiarowymi, co nie tylko potwierdziło trafność modelu numerycznego, ale także umożliwiło jego dalszą kalibrację oraz ocenę rzeczywistej efektywności poszczególnych geometrii wymienników.

5.1.1. Wprowadzenie do badań numerycznych: narzędzia i założenia modelowania

Metoda CFD stanowi jedno z najważniejszych narzędzi w analizie procesów przepływu płynów oraz przenoszenia ciepła. Jej zastosowanie umożliwia precyzyjne modelowanie zachodzących zjawisk, optymalizację konstrukcji wymienników ciepła oraz ocenę ich efektywności energetycznej przy jednoczesnej redukcji kosztów i czasu przeprowadzania badań laboratoryjnych.

1. Modelowanie przepływu i przenoszenia ciepła

ANSYS Fluent jako zaawansowany pakiet CFD, wykorzystuje metodę objętości skończonych (Finite Volume Method, FVM) do dyskretyzacji równań rządzących przepływem płynów, w tym [130]:

- Równania ciągłości (oparte na zachowaniu masy):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (9)$$

- Równania Naviera–Stokesa (zachowanie pędu):

$$\frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho \vec{g} \quad (10)$$

- Równanie energii (opisujące przenoszenie ciepła):

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{u}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_E \quad (11)$$

gdzie ρ to gęstość [kg/m³], $\vec{u}$ – wektor prędkości przepływu [m/s], τ – tensor naprężeń lepkościowych [Pa], p – ciśnienie [Pa], $\vec{g}$ – przyspieszenie grawitacyjne [m/s²], T – temperatura [K], E – energia wewnętrzna [J/kg], k_{eff} – efektywna przewodność cieplna [W/(m·K)], S_E – źródło energii [W/m³]. Operator pochodnej cząstkowej: $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ oznacza zmianę gęstości w czasie. Operator dywergencji $\nabla \cdot (\rho \vec{u})$ oznacza, jak bardzo „rozchodzi się” masa w danym punkcie. Operator konwekcyjny $\nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u})$ – rozchodzenie się pędu (tensorowego) w przestrzeni (jak pęd jest przenoszony przez przepływ), $\nabla \cdot \tau$ – dywergencja tensora naprężeń lepkościowych. Operator gradientu $\nabla \cdot \rho$ – siła wynikająca ze spadku ciśnienia (działa przeciwnie do gradientu ciśnienia).

2. Modelowanie turbulencji

Ze względu na turbulentny charakter przepływów w systemach AGD, przyjęto podejście RANS (*Reynolds-Averaged Navier–Stokes*) – uśrednione równania *Naviera–Stokesa* (metoda uśredniania według Reynoldsa). W ramach RANS pole przepływu dzieli się na uśredniony w czasie składnik i fluktuacje turbulentne. Do modelowania turbulencji stosujemy model k -omega (k - ω) SST (*Shear Stress Transport*), który łączy zalety modeli k -omega i k -epsilon (k - ϵ) zapewniając większą uniwersalność i dokładność w szerokim zakresie przepływów. Szczegóły i przypisania modelu do każdego wariantu podano w Tabeli 13.

Tabela 13. Parametry symulacji.

Wymiennik	Program	Typ siatki	Model turbulencji	Solver/tryb	Dyskretyzacja (energia/pęd)
Wymiennik na bocznej ścianie	ANSYS	Wielościenna + pryzmatyczna warstwa przyścienna	$k-\omega$ SST	pressure-based, steady-state, PISO/Coupled	Second-Order Upwind
HRS	ANSYS	wielościenna	standard $k-\varepsilon$ + enhanced wall treatment	pressure-based, steady-state, SIMPLE/Coupled	Second-Order Upwind
Modułowy	ANSYS	wielościenna	realizable $k-\varepsilon$	pressure-based, steady	Second-Order Upwind
	SolidWorks	wielościenna + oparta na krzywiźnie	standard $k-\varepsilon$	natywne ustawienia programu	natywne

W pobliżu ścian model $k-\omega$ zapewnia lepsze odwzorowanie warstwy przyściennej oraz poprawną predykcję gradientów prędkości i naprężeń ścinających, natomiast w obszarze przepływu daleko od ścian wykorzystywana jest funkcjonalność modelu $k-\varepsilon$, który lepiej radzi sobie z opisywaniem przepływu z dużymi wirami. Dzięki zastosowaniu przełącznika w mechanizmie SST, możliwa jest płynna zmiana pomiędzy tymi podejściami, co czyni model $k-\omega$ SST szczególnie skutecznym w analizach przepływów przyściennych, rozdzielających się i warstw granicznych o dużym gradiencie prędkości. Model ten jest powszechnie stosowany w zastosowaniach inżynierskich, oferując kompromis między dokładnością a kosztami obliczeniowymi. Równania transportu dla turbulentnej energii kinetycznej k oraz specyficznej szybkości rozpraszania ω mają postać:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (12)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \omega) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \nabla \omega \right] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 \quad (13)$$

gdzie μ_t to lepkość turbulentna [Pa·s], k – energia kinetyczna turbulencji [m^2/s^2], ω – częstość zdarzeń wirów, ρ oznacza gęstość [kg/m^3], μ – dynamiczna lepkość molekularna [Pa·s], ε – tempo dyssypacji energii turbulencji [m^2/s^3], ∇k i $\nabla \omega$ – gradienty przestrzenne określające kierunek i tempo zmiany ω w przestrzeni (istotne dla dyfuzji), ρ – gęstość, $\vec{u}$ – wektor prędkości przepływu [m/s], P_k – produkcja energii kinetycznej turbulentnej [W/m^3], σ_k i σ_ω – liczby Prandtla turbulentnego transportu, α oraz β są stałymi modelu [131,132].

Alternatywą dla RANS jest metoda LES (*Large Eddy Simulation*) – symulacja dużych wirów (metoda symulacji dużych struktur turbulencyjnych), w której duże struktury turbulentne są bezpośrednio rozwiązywane, a mniejsze skale są modelowane przy użyciu modeli subsiatkowych SGS (*Subgrid-Scale*). Modele SGS umożliwiają uwzględnienie wpływu mniejszych struktur turbulencyjnych, których nie da się bezpośrednio rozwiązać, na ogólne zachowanie przepływu, co poprawia dokładność symulacji przy jednoczesnym zmniejszeniu wymagań obliczeniowych. LES umożliwia dokładniejsze odwzorowanie widm turbulencji, spójnych struktur oraz procesów mieszania, jednak wymaga znacznie droższych obliczeniowo rozdzielczości przestrzennej i czasowej. W niniejszej pracy zdecydowano się na podejście RANS ze względu na optymalny kompromis między dokładnością a kosztami obliczeniowymi, choć LES stanowi obiecującą alternatywę do dalszych badań.

3. Modelowanie wielofazowe

Do odwzorowania interfejsów między wodą a powietrzem zastosowano metodę Volume of Fluid (VoF), która umożliwia modelowanie dwóch lub więcej niemieszalnych faz przez śledzenie udziału objętości poszczególnych faz w każdej komórce siatki. Interfejs między fazami rekonstruowany jest przy użyciu liniowej metody geometrycznej, co pozwala uwzględnić efekty takie jak napięcie powierzchniowe. Metoda ta jest powszechnie stosowana w symulacjach z powierzchnią swobodną, gdyż pozwala poprawnie odtworzyć kształt i dynamikę granicy faz. W niniejszych obliczeniach jej zastosowanie umożliwiło uchwycenie procesów transportu ciepła i masy na granicy woda–powietrze, co miało istotne znaczenie dla analizy sprawności wymiennika.

4. Warunki brzegowe i dyskretyzacja

Podstawowe założenia modelowania obejmują określenie geometrii wymiennika, parametrów przepływu (prędkość, ciśnienie), właściwości materiałowych oraz warunków brzegowych, które są dostosowane do specyfiki cyklu pracy urządzenia AGD.

Dyskretyzacja przestrzenna została wykonana z użyciem metod drugiego rzędu, co pozwala na dokładne odwzorowanie obszarów o intensywnym transferze ciepła.

5. Oprogramowanie

Na początkowym etapie projektowania modele zostały opracowane przy użyciu SolidWorks 2022, co umożliwiło stworzenie szczegółowych modeli 3D analizowanych układów. Następnie, do przeprowadzenia badań numerycznych wykorzystano oprogramowanie ANSYS Fluent 2022R2 (*Pressure-Based Solver*). To narzędzie zostało zastosowane przy badaniach przeciwbieżnego wymiennika ciepła oraz wymiennika zintegrowanego z układem silnika BLDC, umożliwiając analizę przepływu cieczy, rozkładu temperatur oraz strat ciśnienia w tych systemach. Do przygotowania i modyfikacji geometrii modelowanych układów wykorzystano ANSYS SpaceClaim 2023R1, co pozwoliło na precyzyjną rekonstrukcję rzeczywistych modeli komponentów. Natomiast badania numeryczne modułowego wymiennika ciepła przeprowadzono w SolidWorks Simulation 2023. Umożliwiło to na szczegółową analizę parametrów przepływu oraz efektywności wymiany ciepła w tym układzie.

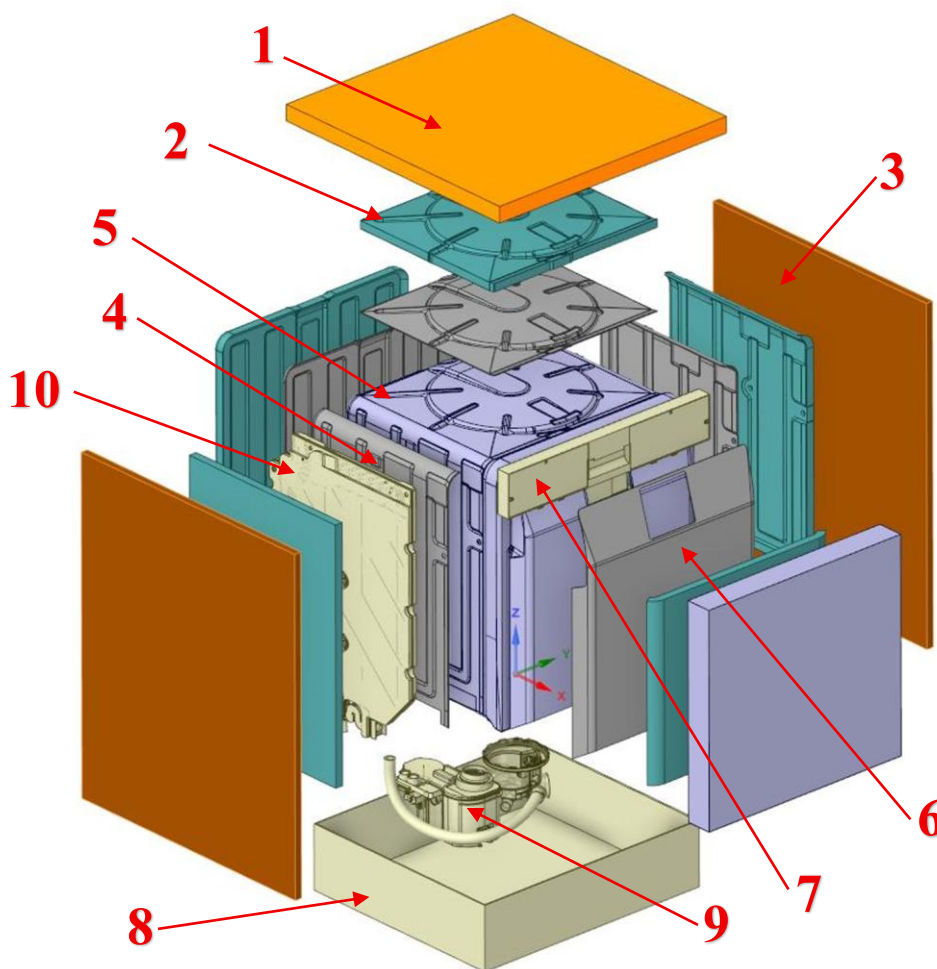
5.1.2. Przeciwbieżny wymiennik ciepła na bocznej ścianie

Ze względu na złożoność cyklu mycia w zmywarce konieczne było uproszczenie analiz, aby objąć wszystkie zależności między komponentami [133,134]. W tym celu zredukowano liczbę etapów procesu – np. pominięto krótkie fazy płukania i suszenia oraz uproszczono sposób sterowania czasowego, koncentrując się na głównych fazach poboru, podgrzewania i cyrkulacji wody. Złożoność konstrukcji zmywarki oferuje szerokie możliwości optymalizacji [135], dlatego konieczne było modelowe podejście, pozwalające ocenić efekty we wszystkich kluczowych aspektach działania urządzenia [136,137].

Geometria modelu przygotowana w ANSYS SpaceClaim 2023R1 (Rys. 17) została oparta na rzeczywistych, komercyjnie dostępnych komponentach zmywarek, a następnie dostosowana do potrzeb obliczeń poprzez usunięcie zbędnych detali (np. drobnych przetłoczeń, zaokrągleń, wnęk), zapewniając spójność układu i ograniczając rozmiar modelu obliczeniowego – co znacznie przyspieszyło uzyskanie wyników.

Dane materiałowe różnych komponentów i cieczy pozyskano z bazy ANSYS Fluent 2022R2 lub literatury. W zakresie uproszczeń zjawisk fizycznych przyjęto m.in. stałe wartości właściwości cieczy (np. lepkości i gęstości wody), pominięto efekty kawitacji i

zmienności napięcia powierzchniowego oraz założono stacjonarny charakter przepływu. Warunki brzegowe zredukowano do kluczowych – ustalonych temperatur i przepływów na wejściu/wyjściu – co umożliwiło uzyskanie stabilnych i zbieżnych wyników w analizach nieliniowych.



Rysunek 13. Geometria układu zmywarki w środowisku obliczeniowym [137].

Rysunek 13. – legenda:

1. Górna pokrywa - zewnętrzna, zazwyczaj stalowa osłona górnej części urządzenia. Stanowi obudowę ochronną i nośnik dla elementów sterowania.
2. Płyta montażowa - służy jako baza do zamocowania modułu panelu sterowania oraz wewnętrznych przewodów i czujników.
3. Izolacja akustyczno-termiczna - zazwyczaj maty lub pianki dźwiękochłonne i termoizolacyjne mocowane do wewnętrznych ścianek obudowy, redukują hałas i utratę ciepła.
4. Panel boczny obudowy - główne, stalowe ścianki boczne zewnętrznej obudowy. Chronią wnętrze oraz nadają sztywność całej konstrukcji.
5. Zewnętrzna obudowa zmywarki - główna komora robocza urządzenia – wykonana najczęściej z tworzywa lub stali nierdzewnej. To w niej odbywa się proces mycia.

6. Panel frontowy/drzwi - frontowa pokrywa z panelem sterowania i drzwiczkami. Zawiera uszczelkę oraz mechanizm zamykania.
7. Listwa montażowa/uchwyt drzwi - służy do stabilnego zamocowania drzwi lub modułu sterowania oraz przekazywania sił przy otwieraniu/zamykaniu.
8. Podstawa - dolna rama nośna, do której przykręcone są nóżki poziomujące, pompa, silnik i inne elementy mechaniczne.
9. Zespół hydrauliczny - moduł pompy odpływowej wraz z silnikiem, przewodami i filtrem. Odpowiada za cyrkulację i odprowadzanie wody.
10. Przerwa powietrzna – zapobiega cofaniu wody podczas procesu mycia. To w nim zaproponowano montaż wymiennika ciepła.

Wprowadzenie i założenia konstrukcyjne:

- Rozwiązanie przeciwbieżnego wymiennika ciepła na bocznej ścianie zmywarki ma na celu odzysk ciepła z wody odpływowej oraz podgrzanie zimnej wody z sieci, co wpływa na obniżenie zużycia energii.
- W konfiguracji projektowej wykorzystano cienką (0,4 mm) rurę aluminiową – materiał o wysokiej przewodności cieplnej – przez którą przepływa gorąca woda po etapie płukania.
- Układ przepływu jest przeciwbieżny: zimna woda (ok. 15 °C) wpływa do zbiornika, gdzie bezpośrednio styka się z zewnętrzną powierzchnią aluminiowej rury, podczas gdy gorąca woda (ok. 55 °C) wypływa z wnętrza zmywarki.
- Zmodyfikowany projekt eliminuje dotychczasowy otwór wentylacyjny, co zwiększa powierzchnię wymiany ciepła oraz wydłuża czas kontaktu między zimnym a gorącym medium.

Dane wejściowe do badań numerycznych oraz założenia modelowe:

- Parametry temperaturowe:
 - Temperatura wody gorącej wynosi około 55 °C, natomiast zimna woda z sieci – 15 °C.
 - Temperaturę otoczenia przyjęto na poziomie 20,4 °C, co wpływa na warunki konwekcyjne na zewnętrznych powierzchniach wymiennika.
- Przepływy masowe:
 - Geometria badana była przy przepływie zimnej wody wynoszącym 0,0417 kg/s, a czas wymiany wynosił 120 s.
- Geometria i meshing:
 - Model CAD wymiennika został uproszczony – redukcja liczby zaokrągleń oraz szczelin umożliwiła stworzenie bardziej efektywnej siatki

numerycznej składającej się z 4 588 633 elementów o minimalnej jakości ortogonalnej równej 0.1507.

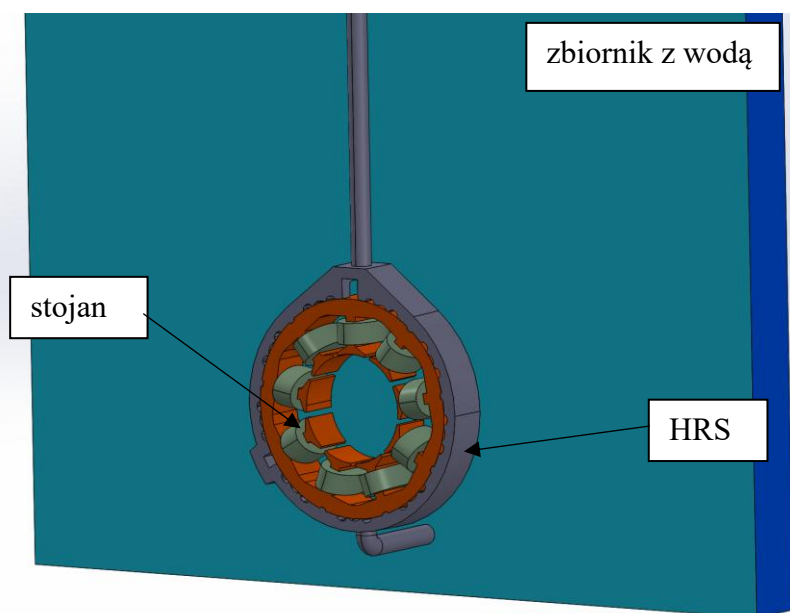
- Przyjęto metodę objętości skończonych (FVM) w oprogramowaniu ANSYS Fluent, co zapewnia dokładne odwzorowanie przepływów oraz gradientów temperatury na krytycznych obszarach. Modelem lepkości zastosowanym w obliczeniach był $k-\omega$ SST z domyślnymi wartościami. Sprężenie ciśnienie-prędkość wykorzystywało schemat *PISO*, dyskretyzacja przestrzenna ciśnienia wykorzystywała metodę *PRESTO!*, a dyskretyzacja udziału objętościowego metodę *compressive*. Reszta metod dyskretyzacji przestrzennej wykorzystywała metody pierwszego rzędu *first order upwind*.

5.1.3. Wymiennik ciepła wokół stojanu silnika BLDC

W ramach tego etapu badań numerycznych opracowano model = przedstawiający proces chłodzenia stojana silnika BLDC (na przykładzie pompy do zmywarki) zintegrowanego z wymiennikiem ciepła [138]. Celem badania było przeanalizowanie zjawisk przepływowo-ciepłnych zachodzących w obrębie systemu chłodzenia, w warunkach możliwie najwierniej odwzorowujących środowisko pracy urządzenia (Rys. 14).

Model geometryczny silnika z wymiennikiem został zaimportowany do środowiska ANSYS Fluent (wersja 2022 R2), a jego objętość obliczeniową poddano dyskretyzacji z użyciem siatki wielościennej (siatka poliedryczna - *polyhedral mesh*), składającej się z 43 452 komórek.

Wysoka dokładność odwzorowania geometrii została zapewniona przez zastosowanie minimalnej jakości ortogonalnej siatki wynoszącej 0,2, co było szczególnie istotne w obszarach intensywnej wymiany ciepła.



Rysunek 14. Przygotowany model HRS w środowisku obliczeniowym.

W celu zapewnienia realizmu warunków brzegowych przyjęto:

- wlot prędkościowy o wartości 0,004 m/s (zbadano laboratoryjnie)
- wylot ciśnieniowy z założonym ciśnieniem 0 Pa.

W badaniach przyjęto warunki ustalone (*steady-state*), zakładając stabilność parametrów pracy w obrębie badanego cyklu. Do opisu turbulencji wykorzystano standardowy model $k-\epsilon$ z funkcjami przyściennymi, zaś w obszarze bezpośrednio przylegającym do ścian (warstwa przyścienna) zastosowano ulepszone podejście (*enhanced wall treatment*), co pozwoliło wierniej odwzorować przepływ i wymianę ciepła na styku powierzchni. W analizie chłodzenia silnika BLDC, gdzie przepływ jest lokalnie ustalony i stabilny, standardowy model $k-\epsilon$ z funkcjami przyściennymi stanowi dobry kompromis między dokładnością oddania efektów cieplnych w wąskich szczelinach a kosztami obliczeniowymi.

W modelu uwzględniono właściwości termiczne materiałów:

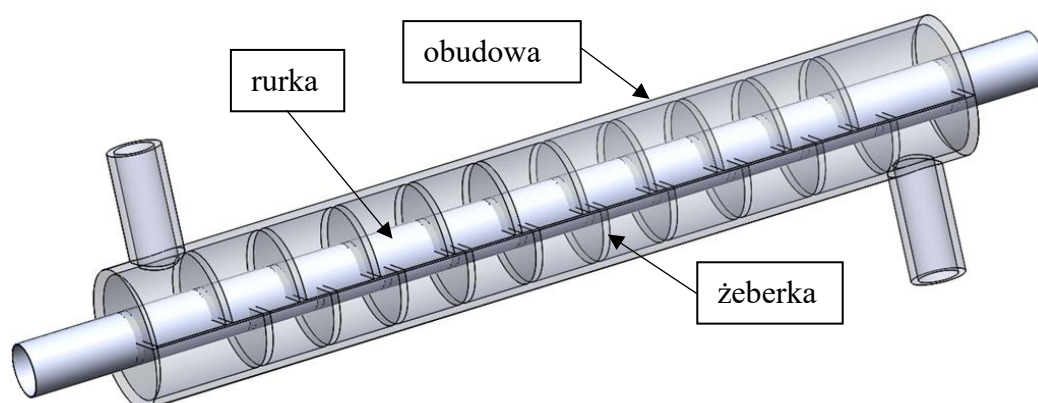
- dla materiału wymiennika PET-G: przewodność cieplna 0,29 W/m·K, (deklaracja producenta)
- dla medium chłodzącego – wody: przewodność cieplna 0,6 W/m·K, ciepło właściwe 4184 J/kg·K.

Warunkiem zakończenia obliczeń było osiągnięcie zbieżności równań transportu: dla energii przy poziomie szczątkowym $\leq 10^{-6}$ oraz dla pędu $\leq 10^{-4}$. Czas badania przyjęto 4h. Tak dobrane kryteria zbieżności oraz parametry modelu pozwoliły na uzyskanie

wiarygodnych wyników przepływowo-termicznych, stanowiących podstawę do dalszych analiz oraz walidacji w badaniach laboratoryjnych w kolejnych etapach pracy.

5.1.4. Modułowy wymiennik ciepła

W niniejszym podrozdziale opisano proces przygotowania modeli numerycznych modułowego wymiennika ciepła, który składa się z plastikowej obudowy wykonanej z polipropylenu (PP) oraz rurki metalowej o średnicy nominalnej 15–20 mm (Rys. 15). W tym rozwiązaniu badanie przeprowadzono na dwóch programach: ANSYS Fluent (2022 R2) oraz SolidWorks Flow Simulation (2023). Ze względu na krótkie czasy obliczeń względem pozostałych proponowanych systemów, rozwiązanie to posłuży jako porównanie wyników obu programów względem siebie.



Rysunek 15. Półprzezroczysty model 3D modułowego wymiennika ciepła.

Siatkę mesh dla obu środowisk (ANSYS Fluent i SolidWorks Flow Simulation) zaprojektowano z następującymi założeniami:

1. Typ siatki

- W ANSYS Fluent wykorzystano siatkę wielościenneą z minimalną jakością ortogonalną 0,2, co zapewnia dobrą dokładność w obszarach intensywnej wymiany ciepła.
- W SolidWorks Simulation zastosowano adaptacyjną siatkę do krzywizn (*curvature-based*).

W przypadku badań prowadzonych w środowisku ANSYS Fluent zastosowano siatkę wielościenną. Wybór ten był podyktowany koniecznością dokładnego odwzorowania gradientów temperatury i prędkości w wymienniku ciepła przy jednoczesnym ograniczeniu liczby elementów obliczeniowych. Siatka wielościenna, dzięki większej liczbie ścian w pojedynczej komórce, zapewnia lepszą reprezentację przepływu niż klasyczne elementy czworościenne, a przy tym pozwala na redukcję liczby elementów nawet o 70% przy zachowaniu tej samej jakości rozwiązania. Dodatkowo poprawia stabilność iteracji solvera, co było istotne przy analizie turbulencji i wymiany ciepła.

Z kolei w przypadku badania w SolidWorks Flow Simulation użyto siatki opartej na krzywiznie. Jest to narzędzie natywnie wbudowane w środowisko CAD, które automatycznie dopasowuje gęstość siatki do lokalnej krzywizny powierzchni geometrycznych. Pozwala to na wierne odwzorowanie kształtów rurek oraz powierzchni wymiennika, co ma kluczowe znaczenie w analizie CFD w tym oprogramowaniu. Wybór tego typu siatki wynikał z ograniczeń samego środowiska (brak siatki wielościennej) oraz z faktu, że siatka oparta na krzywiznie zapewnia optymalny kompromis pomiędzy dokładnością odwzorowania geometrii a kosztami obliczeniowymi.

2. Warstwa przyścienna

- W obu narzędziach wprowadzono warstwę typu przyściennej (*inflation*) w strefach bezpośredniego kontaktu rury z obudową oraz w rejonie przepływu cieczy wokół rury, tak aby zachować y^+ w granicach 30–300 (zalecane dla standardowego modelu $k-\epsilon$ z ulepszonymi funkcjami przyściennymi).
- Grubość pierwszej warstwy przyściennej wynosiła 0,2 mm, a narastanie kolejnych warstw ustawiono na 1,2.

3. Rozdzielczość

- Siatka w obszarze przepływu cieczy została zagęszczona szczególnie w pobliżu przegród wewnętrznych obudowy, gdzie występują lokalne przyspieszenia i zmiany kierunku przepływu. Siatka numeryczna składała się z 2 458 995 elementów)
- Komórki w strefie rury (ściana wewnętrzna) zostały wygenerowane z zachowaniem proporcji krawędzi elementów w granicach 0,5–2 mm, natomiast w części PP pojedyncze elementy miały rozmiar ok. 2–5 mm.

W celu przeprowadzenia realistycznej analizy przepływu i wymiany ciepła w zaprojektowanym modułowym wymienniku ciepła, w środowisku ANSYS Fluent zdefiniowano warunki brzegowe odzwierciedlające typowe parametry pracy zmywarki. Celem badania było określenie efektywności wymiany ciepła pomiędzy zimną wodą wpływającą do urządzenia a wodą odpływającą po zakończeniu etapu mycia.

1. Założenia:

- Strumień masowy przepływu: 2,5 l/min (czyli $4,17 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$).
- Temperatura wlotu zimnej wody: 15 °C.
- Temperatura wlotu ciepłej (zużytej) wody: 55 °C.
- Czas badania: do osiągnięcia stanu ustalonego (ok. 2 min)
- Medium robocze: woda (ciecz), traktowana jako płyn newtonowski, właściwości temperaturowo zależne.

2. Warunki brzegowe:

- Dwa niezależne wloty dla przeciwbieżnych strumieni (zimna i ciepła woda): ustawione jako warunki wlotu prędkości (*velocity inlet*).
- Prędkości obliczone na podstawie przekroju rurki (średnica wewnętrzna: 15 mm).
- Dwa wyloty ciśnienia (*pressure outlets*) (ciśnienie odniesienia: 0 Pa).
- Ściany przewodzące ciepło – zastosowano sprzężoną wymianę ciepła (*conjugate heat transfer*), model przewodnictwa cieplnego przez ściankę rurki (dla aluminium $\lambda \approx 200 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) oraz plastikową obudowę (dla PP $\lambda \approx 0,22 \text{ W/m}\cdot\text{K}$).
- Włączony model energii (*Energy Equation*).

3. Model przepływu:

- Ze względu na charakterystyczne parametry przepływu (2,5 l/min w rurce o średnicy 15 mm), liczba Reynoldsa przekracza 2300, co wskazuje na przepływ turbulentny.
- Szacunkowa wartość $Re \approx \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu}$ wynosi około 3100 dla wody o temp. 15 °C i około 6375 dla wody o temp. 55 °C, co uzasadnia zastosowanie modelu turbulencji.
- Model turbulencji: zastosowano model *k-ε realizable* ze standardowymi funkcjami przyściennymi (*standard wall functions*), ze względu na dobrą stabilność i dokładność w przepływach wewnętrznych.

4. Ustawienia solvera:

- Solver: ciśnieniowy (*pressure-based*), tryb ustalony (*steady-state*).
- Algorytm rozwiązania: solver sprzężony (*Coupled solver*) lub metoda segregowana z algorytmem SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*) dla sprzężenia prędkości i ciśnienia.
- Schemat dyskretyzacji: drugiego rzędu wsteczny (*Second Order Upwind*) dla równań energii i pędu.
- Warunek zbieżności:
 - Energia: 10^{-6}
 - Pęd, ciśnienie, kinetyczna energia turbulencji i rozpad turbulencji: 10^{-4}

5. Ustawienia dodatkowe:

- Zastosowano siatkę heksagonalną z lokalnym zagęszczeniem w obszarze kontaktu rurki z obudową i wlotami.
- Analiza czasu osiągnięcia stanu ustalonego wykazała, że po około 90–100 sekundach profile temperatury oraz gradienty cieplne w rurce stabilizują się.
- Symulacja nieustalona (transjentna) wykorzystana została do porównania z analizą stanu ustalonego w celu kalibracji.

5.2. Badania laboratoryjne

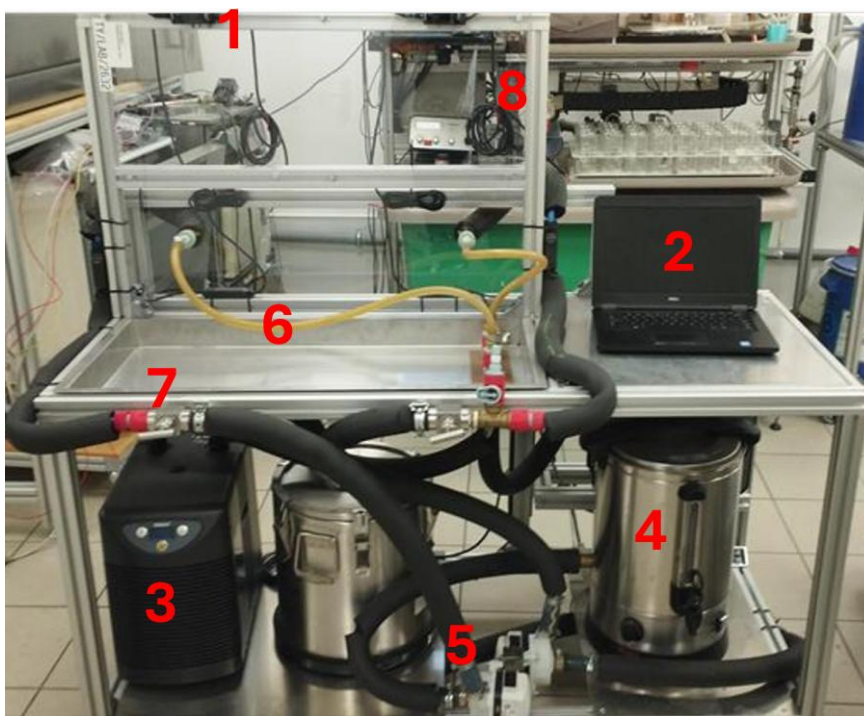
W celu weryfikacji poprawności modeli numerycznych oraz oceny rzeczywistej efektywności zaproponowanych rozwiązań konstrukcyjnych, przeprowadzono serię badań w warunkach laboratoryjnych. Celem badań było odwzorowanie rzeczywistych warunków pracy komponentów układów hydraulicznych i termicznych w zmywarkach, z uwzględnieniem różnych wariantów konstrukcji wymienników ciepła.

Pomiary temperatury, przepływu oraz zużycia energii umożliwiły ocenę skuteczności chłodzenia oraz wymiany ciepła w rzeczywistym środowisku pracy. Wyniki tych testów posłużyły do walidacji numerycznej CFD i wskazania najbardziej efektywnych rozwiązań pod kątem praktycznego zastosowania.

5.2.1. Opis stanowiska badawczego

W celu przeprowadzenia pomiarów laboratoryjnych wykonano dwa stanowiska laboratoryjne, umożliwiające ocenę działania wymienników ciepła w różnych konfiguracjach hydraulicznych i termicznych. Oba układy zostały zaprojektowane z myślą o elastycznej regulacji parametrów przepływu oraz precyzyjnym pomiarze kluczowych wielkości, takich jak temperatura, natężenie przepływu i zużycie energii.

Pierwsze stanowisko (Rys. 16) pozwala na testowanie wymienników ciepła przy użyciu cieczy roboczej o kontrolowanej temperaturze. Składa się ono m.in. z dwóch zbiorników (podgrzewającego i chłodzącego), pompy obiegowej, układu rurociągów z wymiennikiem oraz zestawu czujników i przepływomierzy. Możliwe jest tutaj odwzorowanie dynamicznych zmian warunków pracy poprzez manipulację zaworami i zadawanie różnych wartości przepływu oraz temperatury medium.

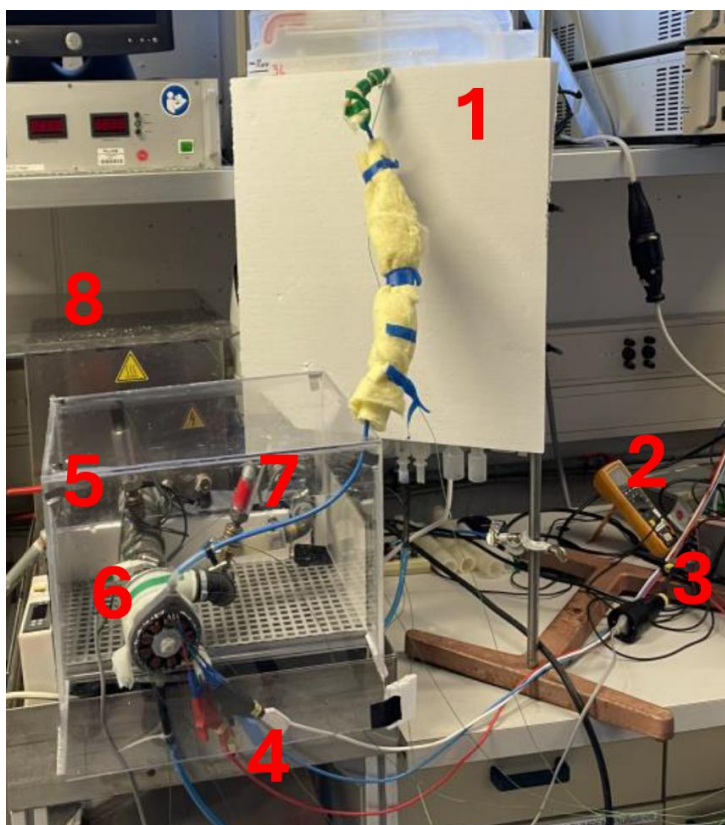


Rysunek 16. Stanowisko laboratoryjne do badań wymiany ciepłej.

Rysunek 16. – legenda:

1. Przepływomierz (Keyence FD-XA1, powtarzalność $\pm 0,1\%$)
2. Rejestrator danych
3. Zbiornik chłodzący (cooler)
4. Zbiornik podgrzewający (bojler)
5. Pompa obiegowa (Omega)
6. Obszar roboczy
7. Zawór regulacyjny
8. Czujnik temperatury (PT100, klasa B, tolerancja $\pm (0,30 + 0,005 \cdot t)$)

Drugie stanowisko (Rys. 17) zostało przygotowane do badania wymiennika ciepła zintegrowanego ze stojanem silnika BLDC. Układ ten umożliwia analizę efektywności odbioru ciepła z pracującego silnika przy chłodzeniu wodnym. Medium doprowadzane jest grawitacyjnie, a całość wyposażono w czujniki temperatury i miernik mocy, co umożliwia ocenę wpływu wymiennika na warunki pracy napędu.



Rysunek 17. Stanowisko do badań systemu HRS.

Rysunek 17. – legenda:

1. Zbiornik z wodą
2. Miernik mocy (N4L PPA530, tolerancja $\pm 0,1\%$)
3. Zestaw pomiarowy (Rack2 NI9211, tolerancja $<0,07\text{ }^{\circ}\text{C}$)
4. Termopary (K-NiCr/Ni klasa 2, tolerancja $\pm 2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$)
5. Przepływomierz (Keyence FD-XA1, powtarzalność $\pm 0,1\%$)
6. Pompa (Omega) z HRS
7. Zawór regulacyjny
8. Zbiornik z wodą dla pompy z HRS

Każde ze stanowisk połączone jest z komputerem, który umożliwia rejestrację danych pomiarowych w czasie rzeczywistym, co znacząco ułatwia późniejszą analizę porównawczą z wynikami badań numerycznych.

5.2.2. Metodyka przeprowadzania badań laboratoryjnych

Niniejsza część przedstawia przebieg badań laboratoryjnych mających na celu sprawdzenie wyników symulacji CFD i ocenę efektywności trzech konstrukcji wymienników ciepła. Krótko omówiono cele badań, zakres wykonywanych testów oraz strukturę procedury pomiarowej — od przygotowania stanowiska, przez zbieranie danych, aż po metody ich przetwarzania i kryteria stanu ustalonego.

Metodologia badań

Badania zostały przeprowadzone w warunkach laboratoryjnych, z zachowaniem kontrolowanych parametrów środowiskowych, aby uzyskać jak najbardziej wiarygodne wyniki. Dla każdego z wymienników były mierzone i rejestrowane następujące parametry:

- temperatura wejściowa i wyjściowa cieczy,
- przepływ masowy cieczy – kontrolowany za pomocą pompy, co pozwala na precyzyjne dostosowanie prędkości przepływu do specyfikacji technicznych wymiennika.

Każdy test trwał określoną ilość czasu – do osiągnięcia stanu ustalonego (ok. 2 minuty).

Kroki metodyczne badań

- Przygotowanie stanowiska testowego – Zamontowanie wymiennika ciepła na stanowisku laboratoryjnym w kontrolowanych warunkach. W przypadku wymiennika zintegrowanego z silnikiem BLDC, zamontowanie modułu chłodzenia cieczą w odpowiedniej pozycji na stojanie silnika.
- Ustawienie parametrów wejściowych – Skonfigurowanie temperatury wody na wejściu oraz ustawienie przepływu cieczy na poziomie odpowiadającym specyfikacji wymiennika.
- Rozpoczęcie cyklu testowego – Uruchomienie cyklu z monitorowaniem parametrów pracy wymiennika. Przez cały czas trwania testu dane będą zbierane przez system pomiarowy.

Dobór aparatury pomiarowej

Do pomiarów zastosowane zostały precyzyjne urządzenia, które umożliwią monitorowanie parametrów pracy wymienników ciepła. Aparatura pomiarowa obejmowała:

- termopary – mierzące temperatury cieczy na wejściu i wyjściu z wymiennika ciepła;
- przepływomierze masowe – kontrolujące przepływ cieczy w celu dokładnego dostosowania prędkości przepływu;

- rejestrator danych – umożliwiający ciągły zapis danych pomiarowych w trakcie badań, co pozwala na ich późniejszą analizę.

Parametry do oceny i analizowane wskaźniki

Na podstawie zebranych danych przeprowadzone zostały obliczenia, które umożliwią ocenę wydajności poszczególnych wymienników. Analizowane wskaźniki obejmują:

- przekazywaną ilość ciepła (Q) – wyznaczaną na podstawie równania bilansu cieplnego;
- efektywność odzysku ciepła – stosunek ilości ciepła odzyskanego przez wymiennik do całkowitej energii zużytej. Wskaźnik ten pozwala ocenić, jak skutecznie wymiennik poprawia sprawność energetyczną urządzenia;
- stabilność temperaturowa silnika BLDC – szczególnie w przypadku wymiennika ciepła wokół stojanu. Mierzona była średnia temperatura silnika podczas trwania cyklu, co pozwalało na ocenę skuteczności chłodzenia wymiennika.

Analiza zebranych danych

Po zakończeniu testów dane zostały przeanalizowane z zastosowaniem odpowiednich metod statystycznych. Ocena wyników pozwoliła określić, który z wymienników ciepła jest najskuteczniejszy w kontekście poprawy efektywności energetycznej oraz skuteczności chłodzenia. Analizowane były również różnice między parametrami pracy wymienników, takie jak różnica temperatur i przepływ cieczy, co umożliwiło wyciągnięcie wniosków na temat optymalnych warunków pracy.

Dla każdego wymiennika zostały przedstawione zestawy danych podsumowujących:

- zestawienie parametrów pracy i efektywności;
- graficzne przedstawienie wyników (np. wykresy temperatury, przepływu);
- rekomendacje dotyczące dalszego rozwoju konstrukcji oraz możliwości wdrożenia.

Plan i metodyka badań laboratoryjnych zostały opracowane w taki sposób, aby uzyskać miarodajne wyniki i ocenić potencjał rozwiązań w zakresie poprawy efektywności energetycznej urządzeń. Dodatkowym celem badań laboratoryjnych była również weryfikacja wiarygodności wyników uzyskanych metodą badań numerycznych. Porównanie rezultatów badań laboratoryjnych z wynikami CFD pozwoliło na ocenę dokładności modeli obliczeniowych i ich przydatności do dalszego rozwoju konstrukcji wymienników. Wyniki tych badań stanowiły podstawę do przeprowadzenia dalszych testów oraz walidacji modeli numerycznych, co pozwoli na pełną ocenę przydatności poszczególnych wymienników w warunkach rzeczywistego użytkowania.

6. Wyniki badań numerycznych i laboratoryjnych

Przedstawione w niniejszym rozdziale wyniki są efektem kompleksowej analizy obejmującej zarówno badania numeryczne, jak i laboratoryjne. Zestawienie danych umożliwia porównanie różnych wariantów konstrukcyjnych wymienników ciepła oraz ocenę ich efektywności w warunkach odpowiadających rzeczywistej pracy urządzenia. Szczególną uwagę poświęcono intensywności wymiany ciepła, stabilności temperaturowej oraz potencjałowi praktycznego zastosowania analizowanych rozwiązań. Istotnym elementem była również ocena zgodności wyników symulacyjnych z wynikami uzyskanymi w warunkach laboratoryjnych.

6.1. Wyniki badań numerycznych

Wyniki badań numerycznych pozwoliły na ilościową ocenę rozkładów temperatur, strumieni ciepłych oraz charakterystyki przepływu w badanych wariantach wymienników. Dzięki zastosowaniu różnych środowisk obliczeniowych możliwe było porównanie modeli zarówno pod kątem jakości odwzorowania zjawisk fizycznych, jak i efektywności cieplnej rozwiązań konstrukcyjnych. Analizowane przypadki obejmowały:

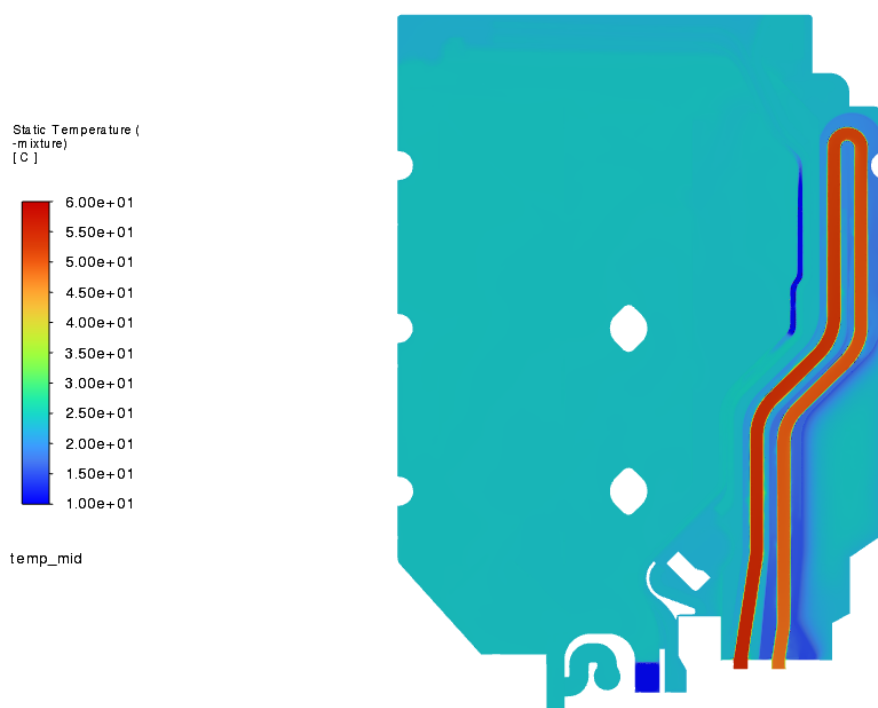
- wymiennik ciepła zintegrowany z boczną ścianą zmywarki (model turbulencji $k-\omega$ SST),
- układ chłodzenia wokół stojanu silnika BLDC ($k-\varepsilon$ standard z *enhanced wall treatment*),
- modułowy wymiennik przeciwprądowy ($k-\varepsilon$ realizable dla ANSYS) / $k-\varepsilon$ standard dla SolidWorks)

Dalsze podrozdziały zawierają szczegółową interpretację wyników dla każdego z wariantów, z uwzględnieniem parametrów przepływowych, współczynników wymiany ciepła oraz obserwowanych trendów temperaturowych.

6.1.1. Efektywność wymiany ciepła w wymienniku na bocznej ścianie zmywarki

W celu analizy efektywności wymiany ciepła przeprowadzono badania numeryczne dla geometrii wymiennika zlokalizowanego na bocznej ścianie komory zmywarki. Ostateczny krok czasowy (120 s) został wybrany do przedstawienia rozkładów pól fizycznych istotnych z punktu widzenia efektywności termicznej.

Rysunek 18 prezentuje konturowy rozkład temperatury w przekroju poprzecznym. Widoczny gradient temperatury pomiędzy wpływającą do wymiennika wodą a otaczającym powietrzem potwierdza skuteczność wymiany ciepła. Zauważalny spadek temperatury przepływającej cieczy wskazuje na przekazanie znacznej ilości energii cieplnej do obszaru komory.

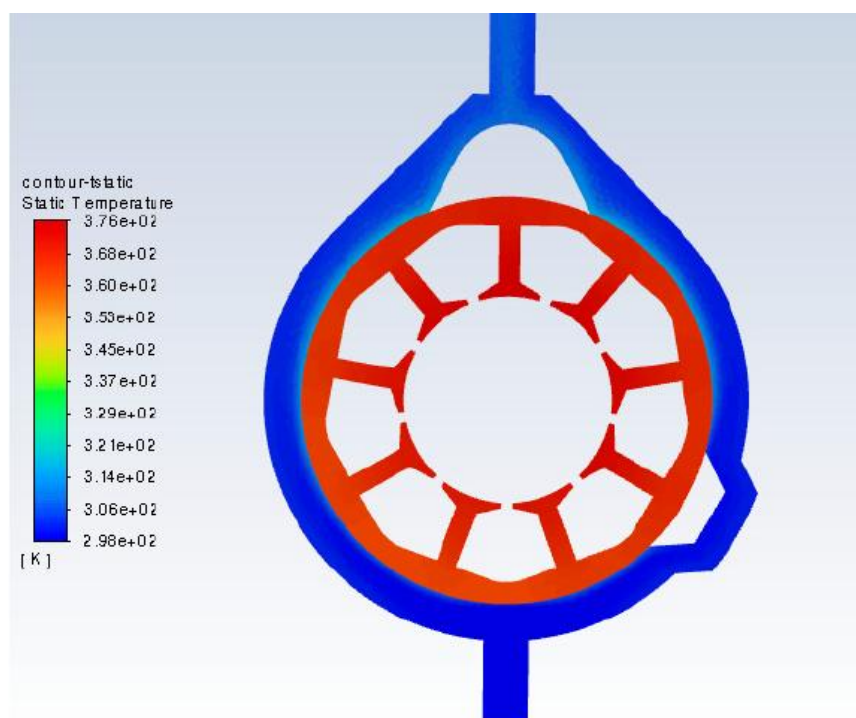


Rysunek 18. Rozkład temperatury w przekroju poprzecznym wymiennika ciepła.

W trakcie przepływu przez rurkę temperatura wody spada z 55 °C do 45 °C. Sumaryczna temperatura wody w geometrii wymiennika na koniec badań wyniosła 23,8 °C (wzrost o 8,8 K) przy przepływie 2,5 l/min oraz przy założeniu ciepła właściwego wody 4200 J/(kg·K)). Teoretyczny zysk energii dzięki wymiennikowi wyniósł 183,92 kJ (~51,1 Wh).

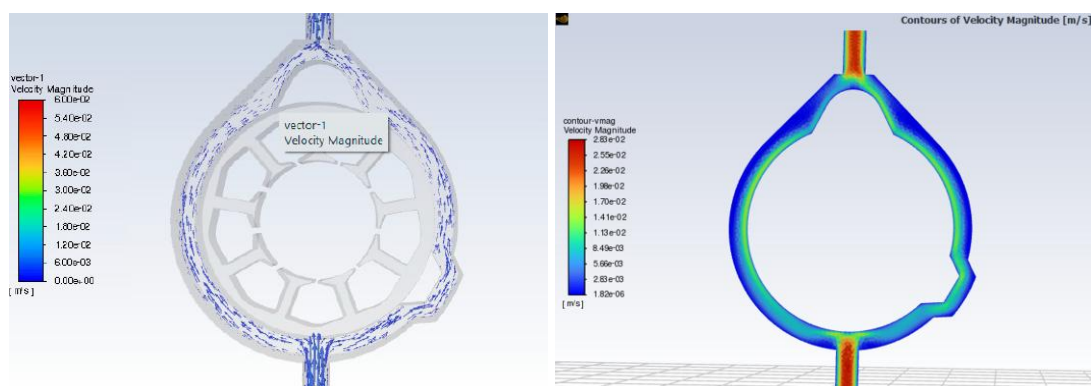
6.1.2. Analiza wymiany ciepła w wymienniku wokół stojanu silnika

Celem przeprowadzonych badań numerycznych było określenie skuteczności odbioru ciepła z powierzchni silnika BLDC za pomocą wymiennika ciepła zintegrowanego z jego obudową (HRS). Tego typu układ może znacząco poprawić zarówno warunki pracy silnika, jak i efektywność energetyczną całego urządzenia. Badanie numeryczne przeprowadzone metodą CFD potwierdza, że podczas pracy silnik osiąga temperaturę rzędu 100 °C w obszarze stojana. Analiza rozkładu temperatury (Rys. 19) wskazuje, że najwyższe wartości występują w rejonie uzwojeń, co jest zgodne z oczekiwanym profilem strat ciepłych. Wyniki te potwierdzają skuteczność zastosowanego systemu chłodzenia w utrzymaniu temperatury w bezpiecznym zakresie eksploatacyjnym.



Rysunek 19. Mapa temperatur w przekroju HRS.

Rysunek 20 prezentuje wektorowe pole przepływu wraz z izoliniami prędkości w przekroju HRS, co pozwala zlokalizować obszary przyrostu prędkości oraz ewentualne strefy recyrkulacji.



Rysunek 20. Mapa wektorów kierunku przepływu oraz kontury pola prędkości w przekroju HRS.

Tabela 14 dostarcza odpowiadających liczbowo parametrów przepływu — masowego natężenia na wlocie i wylocie oraz powierzchniowo ważonych prędkości średnich — dzięki czemu obrazowe informacje z rysunku można bezpośrednio powiązać z globalnymi warunkami przyjętymi w symulacji. Takie zestawienie umożliwia ocenę spójności pola prędkości z przyjętymi warunkami brzegowymi oraz identyfikację rejonów istotnych dla efektywności wymiany ciepła.

Tabela 14. Parametry prędkości w symulacji.

Natężenie przepływu masy	wartość	jednostka
wlot płynu	0.00023391044	kg/s
wylot płynu	-0.00023390589	kg/s
Netto (różnica wlot vs. wylot)	4.5442482×10^{-9}	kg/s
Powierzchniowo ważona średnia wartość prędkości		
Dopływ płynu	0.0038433596	m/s
Odpływ płynu	0.0038363202	m/s

Wartość przepływu netto jest praktycznie zerowa ($4,54 \times 10^{-9}$ kg/s), co wskazuje, że w symulowanym układzie dobrze zachowana jest zasada ciągłości masy – ilość płynu wpływającego niemal idealnie równa się tej wypływającej. Niewielka różnica między dopływem a odpływem (rzędu wielkości 10^{-9} kg/s) to efekt numerycznego błędu obliczeń; w praktyce oznacza ona bardzo dobrą dokładność rozwiązania.

Powierzchniowo ważone wartości prędkości pokazują średnią prędkość przepływu przez przekroje wlotowy i wylotowy: obie wynoszą około $3,84 \times 10^{-3}$ m/s. Różnica między nimi (0,00384336 vs. 0,00383632 m/s) również świadczy o minimalnych zaburzeniach numerycznych i spójności wyników.

Taki poziom zgodności parametrów wlotu i wylotu jest typowy dla dobrze skonfigurowanych badań numerycznych, gdzie dąży się do uzyskania stanu stacjonarnego i zapewnienia zachowania masy oraz pędu w całym obszarze obliczeniowym.

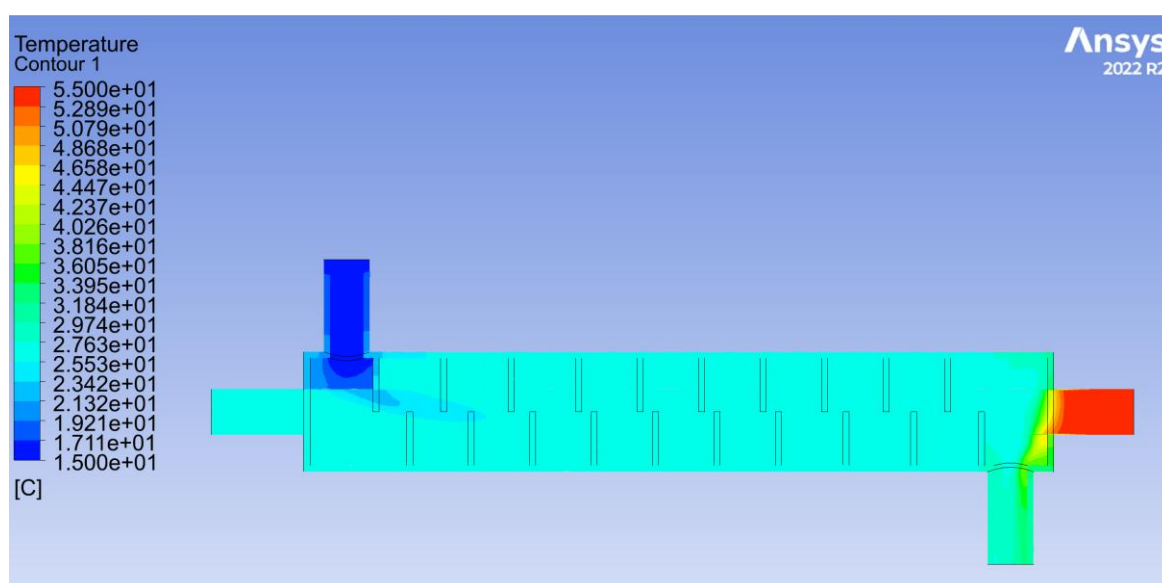
Badania numeryczne pozwoliły na wyznaczenie rozkładu lokalnego strumienia ciepłego na powierzchni wymiennika HRS („wall heat flux”), którego średnia wartość wyniosła około $q \approx 3,0 \times 10^3 \text{ W/m}^2$. Zakładając sumaryczną aktywną powierzchnię wymiany wynoszącą około $A_{HRS} = 0,024 \text{ m}^2$ (wymiary HRS), całkowity odbierany strumień energii oszacowano jako $\dot{Q}_{num} = q \cdot A_{HRS} \approx 72 \text{ W}$. Należy podkreślić, że jest to wynik numeryczny uzyskany przy określonych założeniach brzegowych i sposobie uśredniania pola; nie stanowi on automatycznego potwierdzenia energetycznego w warunkach eksperymentalnych. Ponadto dokumentacja techniczna pompy podaje moc pobieraną 80 W - ale tylko część tej mocy pojawia się jako straty ciepłne silnika (zależnie od sprawności). Zgodnie z bilansem energetycznym urządzenia ($P_{in} = 80 \text{ W}$ i $\eta_{motor} \approx 60\text{--}70\%$) oczekiwane straty ciepłne silnika wynoszą $P_{straty} \approx 24\text{--}32 \text{ W}$. W konsekwencji, przyjmując spójność bilansu, proponuje się traktować wartość odzysku z HRS jako $\dot{Q}_{est} \approx 0,8 - 0,9 \cdot P_{straty} \approx 22 - 28 \text{ W}$ (jako realistyczną, skorygowaną estymatę). Różnica między $\dot{Q}_{num}$ a $\dot{Q}_{est}$ wskazuje na konieczność walidacji kalorymetrycznej (pomiaru strumienia masowego i entalpii odpływającej wody) oraz doprecyzowania, które elementy modelu CFD (np. wpływ obudowy, straty mechaniczne, rezystancja termiczna interfejsu) przyczyniły się do wyższej wartości numerycznej. Obserwowane obniżenie temperatury stojana z około 140 °C (bez wymiennika) do poniżej 100 °C (z wymiennikiem) jest zgodne z przewidywanym kierunkiem działania układu i świadczy o istotnym efekcie chłodzenia; ostateczna kwantyfikacja rzeczywistego odzysku energii wymaga jednak pomiaru energetycznego lub kalorymetrii stanowiskowej. W świetle powyższego wartość $\dot{Q}_{num}$ należy traktować jako wynik modelu CFD, a wartość $\dot{Q}_{est}$ jako estymatę przyjętą do bilansów energetycznych z podaną niepewnością.

6.1.3. Efektywność modułowego wymiennika ciepła

W tej sekcji przedstawiono wyniki badań numerycznych przeprowadzonych w dwóch niezależnych środowiskach – SolidWorks Flow Simulation oraz ANSYS Fluent – umożliwiających ocenę rozkładu temperatury i efektywności transferu ciepła w modułowym

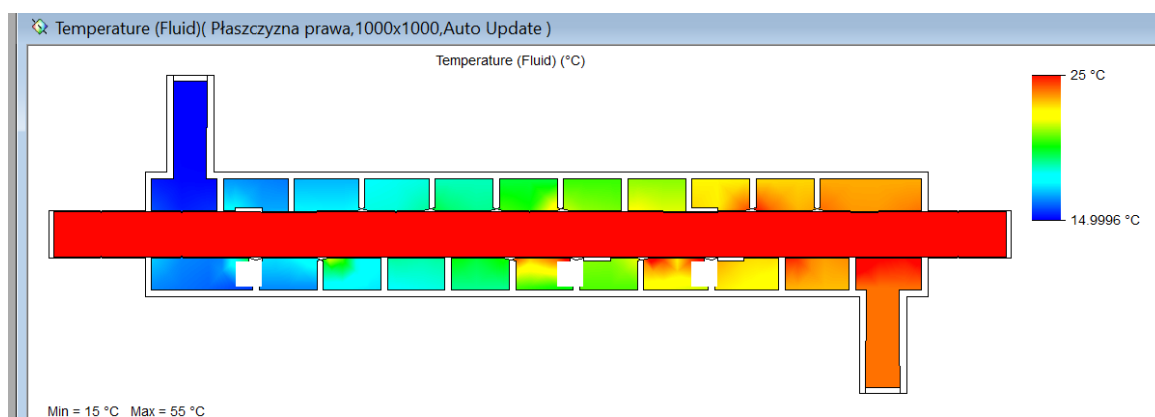
wymienniku ciepła. W obu modelach zastosowano te same warunki brzegowe (temperatura gorącej wody: 55 °C w rurce wewnętrznej; temperatura zimnej wody: 15 °C w kanale zewnętrznym; przepływ: 2,5 l/min; czas badania: 120 s), różniły się jednak rodzajem siatki obliczeniowej oraz algorytmami rozwiązywania równań *Naviera–Stokesa*.

W ANSYS maksymalna temperatura w komorze wewnętrznej osiągała 55 °C przy wlocie gorącej wody, a na wylocie spadała do około 52 °C. Rozkład temperatur wzdłuż kolejnych segmentów jest płynny, bez wyraźnych lokalnych „zimnych” czy „gorących” stref, co świadczy o optymalnym ukształtowaniu deflektorów i równomiernym przepływie przeciwbieżnym (Rys. 21).



Rysunek 21. Wyniki badań numerycznych w ANSYS Fluent.

W środowisku obliczeniowym SolidWorks zaobserwowano bardzo podobny gradient temperatury: wewnątrz rurki od 55 °C przy wlocie do ok. 52–53 °C przy wylocie. W kanale zewnętrznym zimna woda rozgrzewa się do około 23–25 °C. Nieznacznie większy gradient temperatury w niektórych segmentach sugerują nieco większy poziom numerycznej dyspersji związany ze współczynnikiem turbulentności lub gęstością siatki MES (Metoda Elementów Skończonych), której jakość ma bezpośredni wpływ na dokładność odwzorowania pola temperatury (Rys. 22). Metoda ta umożliwia przybliżone rozwiązanie równań różniczkowych opisujących przewodnictwo cieplne i przepływ płynu poprzez dyskretyzację badanego obszaru na skończoną liczbę elementów. Gęstość i regularność siatki decydują więc o stopniu odwzorowania gradientów lokalnych oraz stabilności rozwiązania.



Rysunek 22. Wyniki badań numerycznych w SolidWorks Flow Simulation.

Tabela 15. Porównanie wyników badań numerycznych.

Wielkość	ANSYS	SolidWorks
$T_{h,out}$	$\sim 52,0\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\sim 52,5\text{ }^{\circ}\text{C}$
$T_{c,out}$	$\sim 25,5\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\sim 24,5\text{ }^{\circ}\text{C}$
Maksymalna lokalna zmienność ΔT (3)	$\sim 35,5\text{ K} \rightarrow \sim 38,4\text{ K}$ LMTD	$\sim 35,5\text{ K} \rightarrow \sim 34,7\text{ K}$ LMTD

Różnice rzędu $0,5\text{--}1\text{ }^{\circ}\text{C}$ pokazane w Tabeli 15 wynikają przede wszystkim z:

- Modelowania turbulencji – w SolidWorks zastosowano standardowy model $k-\varepsilon$ z korekcjami empirycznymi, natomiast w ANSYS użyto bardziej zaawansowanego modelu *realizable k-ε*, który lepiej odwzorowuje efekty mieszania w przepływach z dużymi zakrętami i zmianami kierunku. Może to skutkować bardziej realistycznym rozkładem temperatury w ANSYS, zwłaszcza w strefach z deflektorami.
- Metody aproksymacji właściwości fizycznych cieczy – ANSYS umożliwia interpolację właściwości termofizycznych (takich jak gęstość, lepkość, ciepło właściwe) jako funkcji temperatury, co zapewnia większą dokładność obliczeń w układach z dużą różnicą temperatur. W SolidWorks właściwości są często przyjmowane jako stałe, co może prowadzić do drobnych odchyleń.
- Schematów numerycznych i stabilności obliczeń – różnice mogą także wynikać z odmiennej metody rozwiązywania równań transportu energii i pędu: ANSYS stosuje domyślnie metody wyższych rzędów (np. *second-order upwind*), które lepiej odwzorowują gradienty w przepływach turbulentnych, podczas gdy SolidWorks może bazować na bardziej zachowawczych, uśredniających schematach.

Pomimo różnic wynikających z zastosowanych narzędzi numerycznych (Tabela 14), zarówno ANSYS Fluent, jak i SolidWorks Flow Simulation potwierdzają, że modułowy

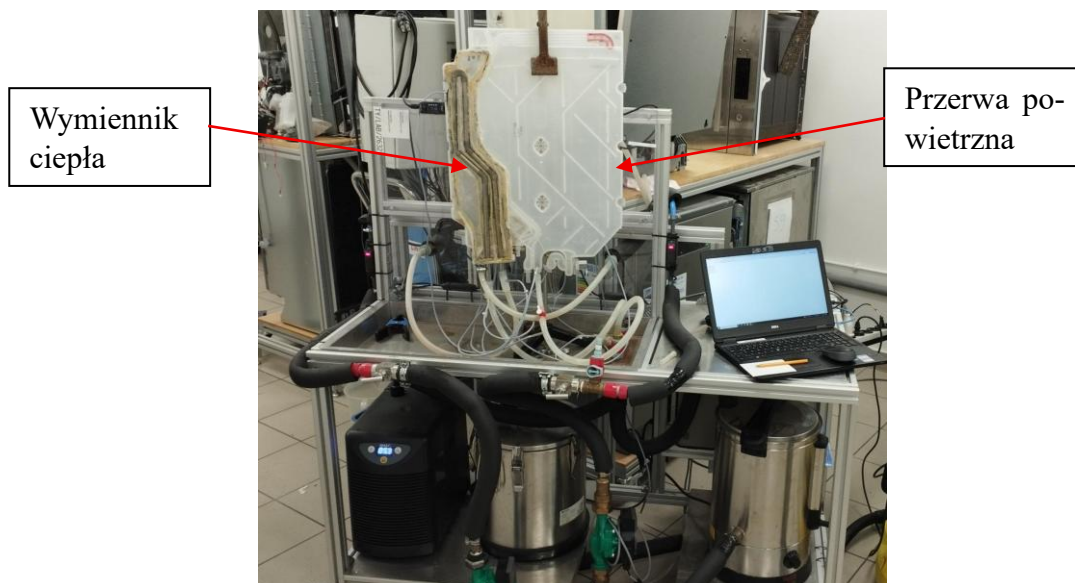
wymiennik ciepła charakteryzuje się stabilnym i jednolitym przepływem ciepła. Uzyskana moc cieplna — określona jako strumień energii przekazywanej przez wymiennik w jednostce czasu — wynosi odpowiednio około 475 W (ANSYS) oraz 460 W (SolidWorks). Takie wartości są zgodne z oczekiwaniami wynikającymi z obliczeń teoretycznych i obserwacji empirycznych, co świadczy o poprawnej pracy modelu oraz efektywnym transferze ciepła. Potwierdzenie porównywalnych wartości mocy cieplnej w dwóch niezależnych środowiskach obliczeniowych zwiększa wiarygodność wyników i wskazuje, że zaprojektowana geometria wymiennika jest skuteczna w odzyskiwaniu energii cieplnej w zakładanych warunkach pracy.

6.2. Wyniki badań laboratoryjnych

W niniejszym rozdziale zaprezentowano zestawienie wyników pomiarów uzyskanych podczas testów trzech wariantów wymienników ciepła, prowadzonych w warunkach laboratoryjnych.

6.2.1. Testy wymiennika na bocznej ścianie zmywarki

Badanie zostało przeprowadzone na stanowisku badawczym do analizy efektywności wymiany cieplnej (Rys. 23). Stanowisko składa się z dwóch obiegów cieczy – gorącej i zimnej – prowadzonych przez przeciwległe kanały wymiennika, co pozwala na realizację konfiguracji przepływu przeciwprądowego. Główne komponenty stanowiska to: obieg wody ciepłej i zimnej, termopary, przepływomierze, układ pomiarowo-rejestracyjny. Stanowisko umożliwia przeprowadzenie badań rzeczywistych w warunkach pracy zmywarki poprzez nastawę przepływów i temperatur odpowiadających profilom eksploatacyjnym.



Rysunek 23. Badanie wymiennika ciepła na bocznej ścianie.

Celem badania było zweryfikowanie efektywności wymiany ciepła pomiędzy strumieniem wody ciepłej o temperaturze zadanej $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ a strumieniem wody zimnej o temperaturze początkowej $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, pracujących w konfiguracji przeciwprądowej. Przyjęto następujące parametry graniczne:

- Temperatura zasilania wody gorącej: $55 \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Temperatura zasilania wody zimnej: $15 \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Zakres przepływu: $2,5\text{ l/min}$ (stały w obu obiegach)
- Czas trwania testu: 120 s (do osiągnięcia stanu ustalonego)

Metodyka pomiarowa

1. Rozgrzewanie i stabilizacja

- Uruchomiono oba obiegi, doprowadzono do zadanych temperatur i przepływów.
- Oczekiwano stabilizacji odczytów termopar przez co najmniej 60 s przed rozpoczęciem akwizycji właściwych danych.

2. Rejestracja danych

- Pomiar temperatury wody gorącej na wlocie (Hot in) i wylocie (Hot out).
- Pomiar temperatury wody zimnej na wlocie (Cold in) i wylocie (Cold out).
- Zapisywano sygnały z częstotliwością 1 Hz przez 120 s .

3. Warunki przeciwprądowe

Strumień gorący i zimny kierowano w przeciwnych kierunkach, co maksymalizuje gradient temperatury wzdłuż wymiennika.

4. Wyniki pomiarów

Na Rysunku 24 przedstawiono przebieg czasowy temperatur obu strumieni w funkcji czasu testu:

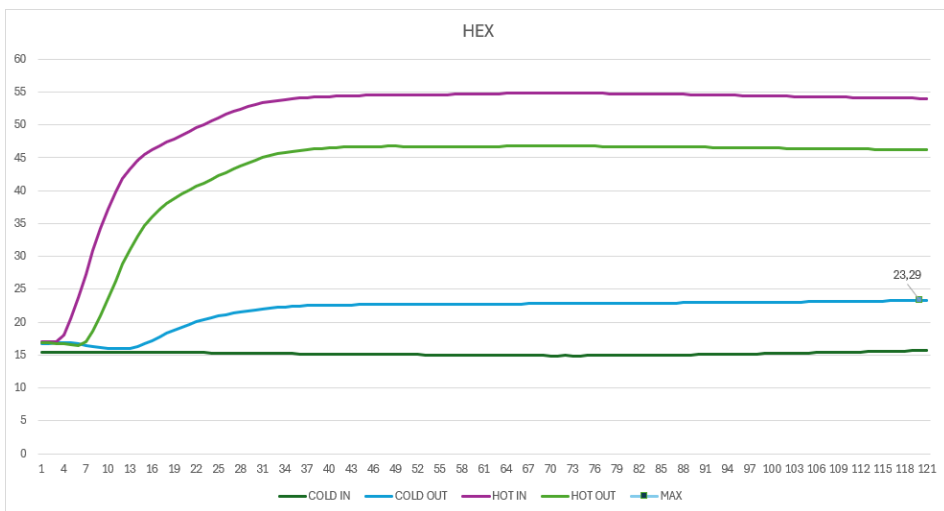
- W czasie ok. 15 s od rozpoczęcia testu zaobserwowano narastanie temperatury na wylocie strumienia zimnego (Cold out).
- Po upływie 40 s system osiągnął stan ustalony, gdzie wartości temperatury na wylocie strumienia oscylowały wokół 23 °C.
- Stabilna różnica między temperaturą zimnej wody na wlocie i wylocie wyniosła ok. 8 K.

Dodatkowo obliczono współczynnik przejmowania ciepła α oraz skuteczność wymiennika ε według wzorów:

$$\alpha = \frac{\dot{Q}}{A\Delta T_{lm}} \quad (14)$$

$$\varepsilon = \frac{T_{c,out} - T_{c,in}}{T_{h,in} - T_{c,in}} \quad (15)$$

gdzie, α – współczynnik przejmowania ciepła, ε – skuteczność wymiennika, $\dot{Q}$ – moc cieplna (chwilowy strumień ciepła), A – całkowita efektywna powierzchnia wymiany ciepła oraz ΔT_{lm} – logarytmiczna różnica temperatur.



Rysunek 24. Wyniki testu wymiennika ciepła na bocznej ścianie zmywarki.

5. Analiza i wnioski

- Skuteczność wymiennika w badanej konfiguracji przeciwpłdowej wyniosła $\varepsilon \approx 0,20$, co odpowiada wartościom typowym dla wymienników rurowych. Wartość ta świadczy o umiarkowanej skuteczności wymiany ciepła, w których zawarta geometria i niewielka szczelina pomiędzy rurą z ciepłą wodą a przestrzenią wokół niej ograniczają gradient temperatury i powierzchni przepływu.
- Wyliczony współczynnik przejmowania ciepła $\alpha \approx 566 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ potwierdza dobrą sprawność termiczną projektu.
- Suma energii przekazanej w ciągu testu wyniosła $\approx 46,44 \text{ Wh}$.

Uzyskane wyniki potwierdzają poprawność założeń numerycznych oraz stanowią podstawę do dalszej optymalizacji geometrycznej w kolejnych iteracjach konstrukcji wymiennika.

6.2.2. Testy wymiennika HRS

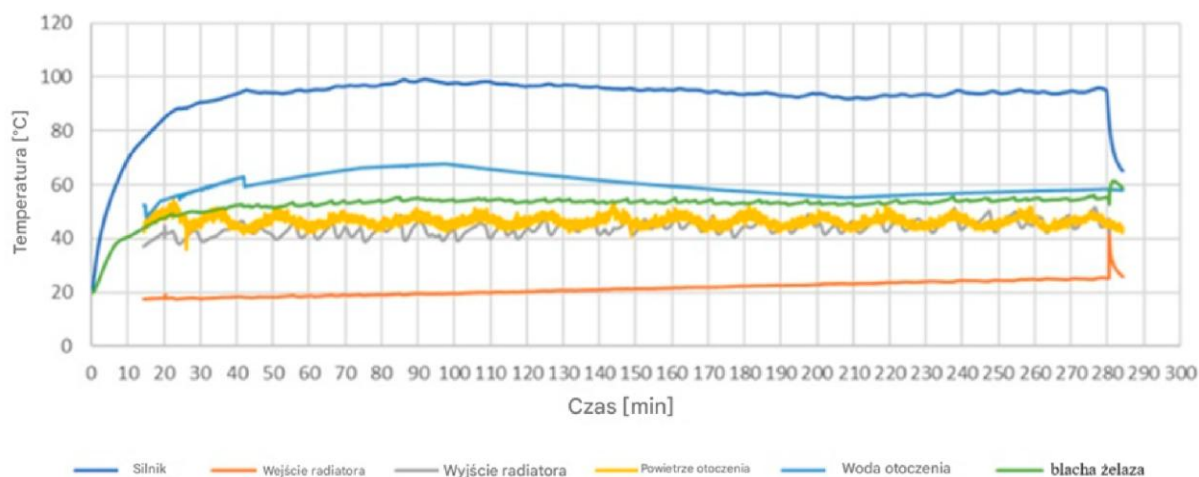
Test został przeprowadzony na stanowisku badawczym przedstawionym na Rysunku 25. Stanowisko to odwzorowuje rzeczywiste warunki pracy wymiennika ciepła zintegrowanego z obudową silnika pompy. Jego konstrukcja umożliwia kontrolowany przepływ cieczy roboczej przez układ oraz rejestrację parametrów termicznych, takich jak temperatura cieczy na wejściu i wyjściu, temperatura obudowy silnika oraz przepływ masowy.

Celem testu było zweryfikowanie efektywności wymiany ciepła pomiędzy stojanem silnika a płynem chłodzącym przepływającym przez wymiennik zewnętrzny. Przyjęto parametry graniczne zgodne z wynikami uzyskanymi w badaniach numerycznych (CFD), masowy przepływ wody oraz warunki temperaturowe odpowiadające rzeczywistej pracy silnika w zmywarce.

W trakcie testu mierzono temperatury:

- cieczy chłodzącej
- obudowy silnika (stojana),
- temperaturę otoczenia
- czas potrzebny do osiągnięcia stanu ustalonego.

Wyniki pomiarów przedstawiono na wykresie poniżej (Rys. 25), który pokazuje przebieg temperatury w funkcji czasu. Zarejestrowano istotne obniżenie temperatury korpusu silnika, który stabilnie wacha się w okolicach 100 °C.



Rysunek 25. Wyniki testu chłodzenia HRS w komorze grzewczej.

6.2.3. Wyniki modułowego wymiennika ciepła

W ramach badań laboratoryjnych przeprowadzonych w celu weryfikacji numerycznej oraz oceny wydajności cieplnej opracowanego modułowego wymiennika ciepła, wykonano serię testów ukierunkowanych na pomiar rzeczywistych parametrów pracy w warunkach laboratoryjnych. Celem tych badań było zarówno potwierdzenie wyników uzyskanych w badaniach numerycznych, jak i zidentyfikowanie obszarów wymagających dalszej optymalizacji konstrukcji. Poniższy opis przedstawia kolejne etapy badań, od przygotowania modelu referencyjnego, przez montaż stanowiska pomiarowego, aż po analizę wyników, a także wskazuje na rozszerzenie badań o dodatkowe warianty geometrii modułowego wymiennika ciepła.



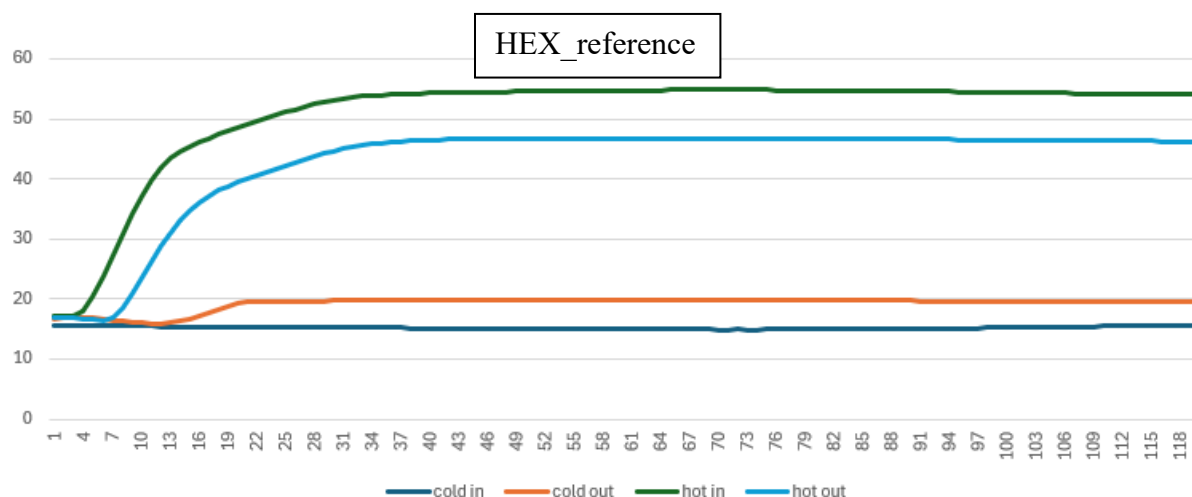
Rysunek 26. Modułowy wymiennik przygotowany do badań.

Na Rysunku 26 zaprezentowano model referencyjny modułowego wymiennika ciepła, który stał się bazą zarówno dla testów laboratoryjnych, jak i weryfikacji numerycznej. Sama konstrukcja zawierała precyzyjnie wykonane kanały przepływowe oraz osadzone w strategicznych punktach termopary, co pozwoliło na dokładny pomiar różnicy temperatur czynnika na wlocie i wylocie.



Rysunek 27. Zamontowany modułowy wymiennik ciepła w testerze badawczym.

Następnie, zgodnie z układem pokazanym na Rysunku 27, model referencyjny został zamontowany w stanowisku badawczym, w którym odpowiedni zestaw hydrauliczny zapewniał stały strumień wody cieplej i zimnej, a przepływomierze umożliwiały utrzymanie oraz rejestrację stabilnych warunków przepływu medium.



Rysunek 28. Wyniki testu wymiany ciepła dla modułowego wymiennika.

Wyniki pomiarów przedstawione na Rysunku 28 ukazują charakterystyki temperaturowe badanej konstrukcji. W każdej z serii pomiarowych, po załączeniu przepływu, różnica temperatur ΔT między wlotem a wylotem ustalała się w ciągu kilku sekund, potwierdzając dobre dopasowanie modelu do rzeczywistych warunków pracy. Badania numeryczne wykazały, że temperatura wody zimnej wzrosła z 15 °C do około 24–25 °C, natomiast w badaniach laboratoryjnych zanotowano wzrost jedynie do około 20 °C. Te rozbieżności względem wyników badań numerycznych można tłumaczyć efektami strat ciepła do otoczenia oraz możliwymi niedokładnościami w modelu numerycznym, na przykład przybliżeniami warunków brzegowych.

Tabela 16. Zależność grubości ścianki i średnicy rurki na uzysk cieplny.

Średnica [mm]	Materiał	Grubość ścianki [mm]	Uzysk cieplny [K]
d20	304ST	0,25	3,33
d20	304ST	0,5	2,9
d25	304ST	0,25	6,37
d25	304ST	0,5	6,31
d30	304ST	0,5	6,06
d35	304ST	0,5	5,95
d50	304ST	0,5	4,14
d14	SSiC	2,25	5,17
d19	SSiC	2,25	2,6

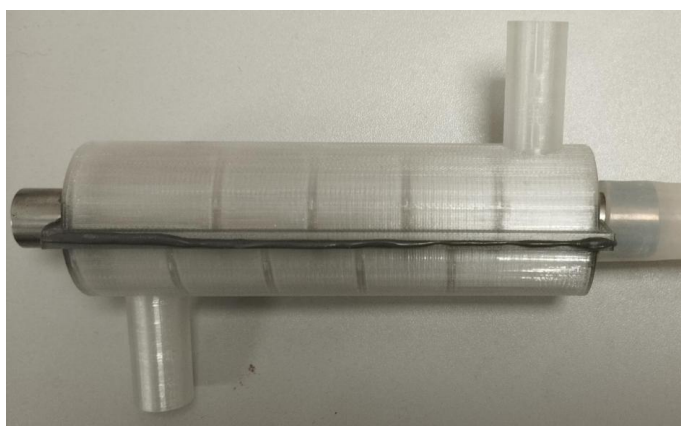
Dodatkowo wykonano serię testów zmieniając grubość ścianki oraz średnicę zewnętrzną rury. Pozwoliło to ocenić, jak te parametry wpływają zarówno na opór hydrauliczny, jak i intensywność wymiany ciepła, wskazując optymalne kombinacje dla różnych scenariuszy przepływowych. (Tabela 16).

Analiza danych z Tabeli 16 pokazuje, że w przypadku rur ze stali 304ST największy przyrost temperatury (uzysk cieplny) uzyskano dla średnicy d25 mm – niezależnie od grubości ścianki ($\Delta T \approx 6,3$ K). Zmniejszenie grubości ścianki z 0,5 mm do 0,25 mm na średnicy d20 poprawiało uzysk z 2,9 K do 3,33 K, ale przy większych średnicach (d30–d50 mm) dalszy wzrost przekroju prowadził już do stopniowego spadku ΔT (z 6,06 K dla d30 do 4,14 K dla d50). Dla ceramicznych rurek SSiC, o znacznie większej grubości ścianki (2,25 mm), uzysk cieplny był nieco niższy lub porównywalny: 5,17 K dla średnicy d14 mm i tylko 2,6 K przy d19 mm. Oznacza to, że optymalny kompromis między przewodnictwem cieplnym a oporem przepływu osiąga się w przypadku cienkościennych stalowych rur o średnicy około 25 mm.

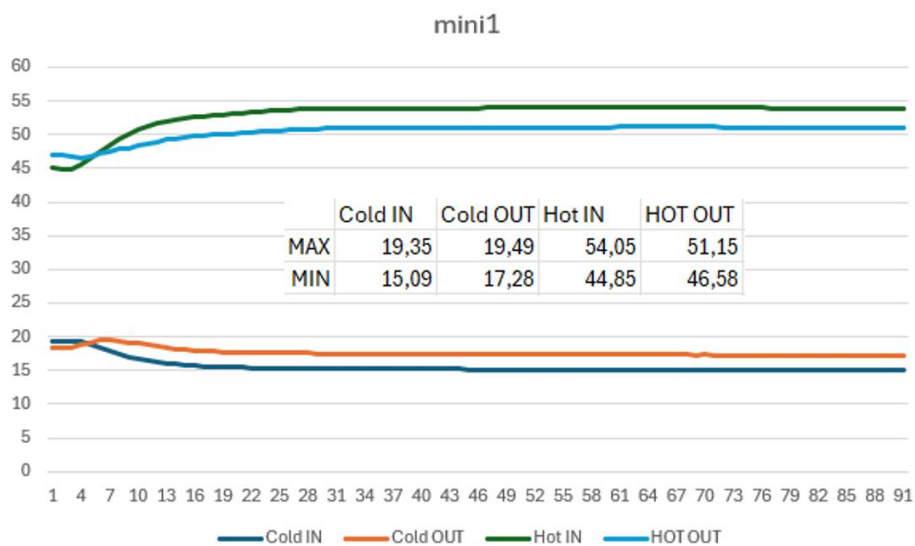
Kolejne warianty modułowego wymiennika stanowią rozszerzenie badań, mające na celu zbadanie wpływu geometrii kanałów na opór hydrauliczny oraz intensywność wymiany ciepła. Choć nie były one głównym odniesieniem dla weryfikacji modelu referencyjnego, dostarczyły cennych wskazówek dotyczących możliwych kierunków optymalizacji.

Warianty modułowego wymiennika ciepła wraz z wykresami z przeprowadzonych badań laboratoryjnych:

- Modułowy wymiennik ciepła „Mini”



Rysunek 29. Modułowy wymiennik ciepła "Mini".

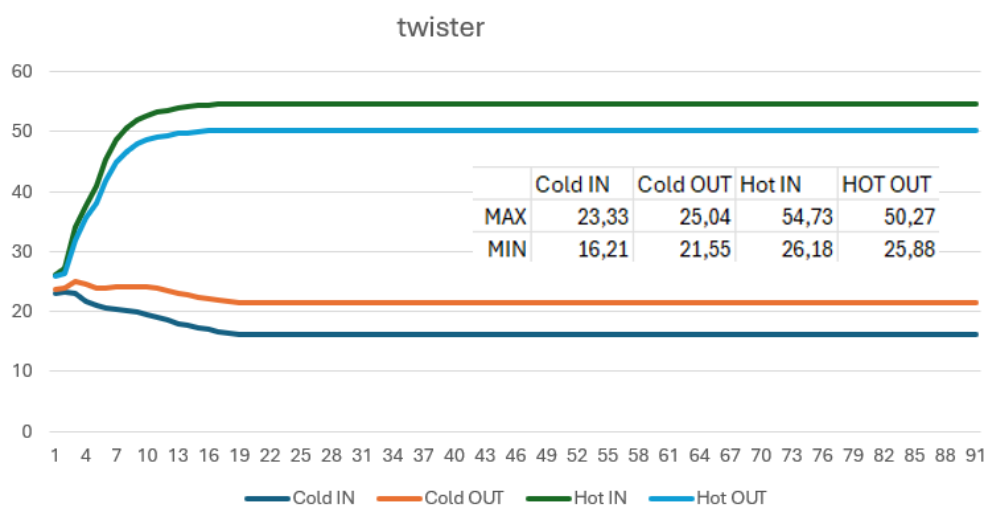


Rysunek 30. Wykres wymiany ciepła dla "Mini".

- Modułowy wymiennik ciepła „Twister”

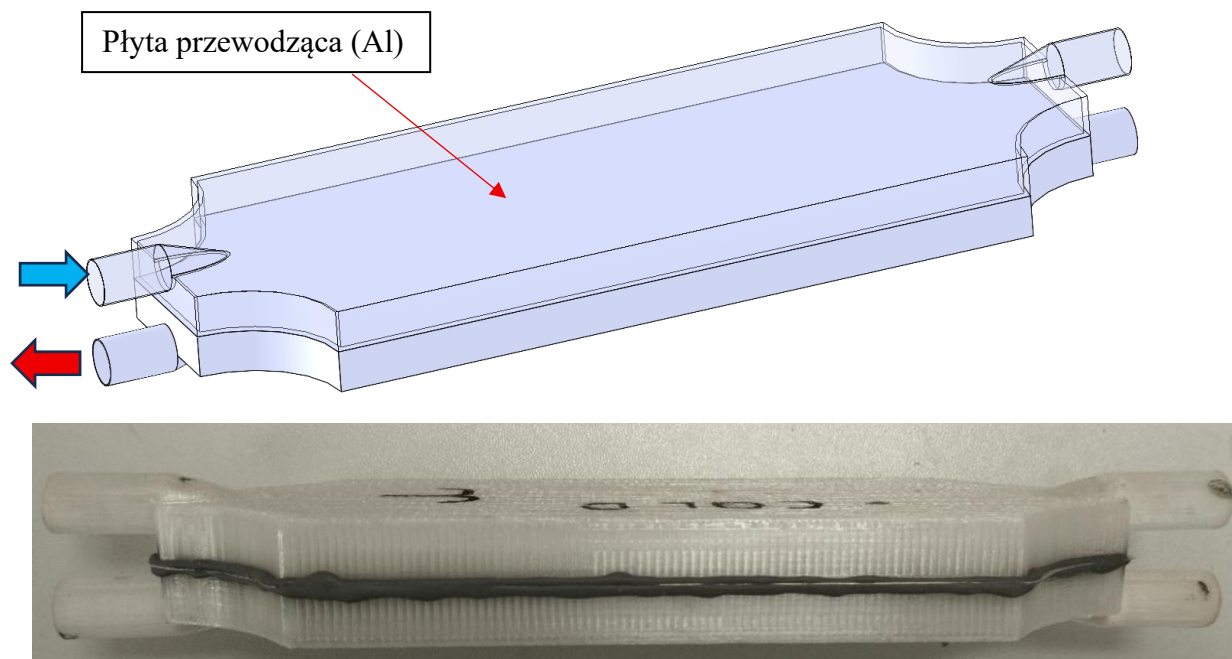


Rysunek 31. Modułowy wymiennik ciepła „Twister”.

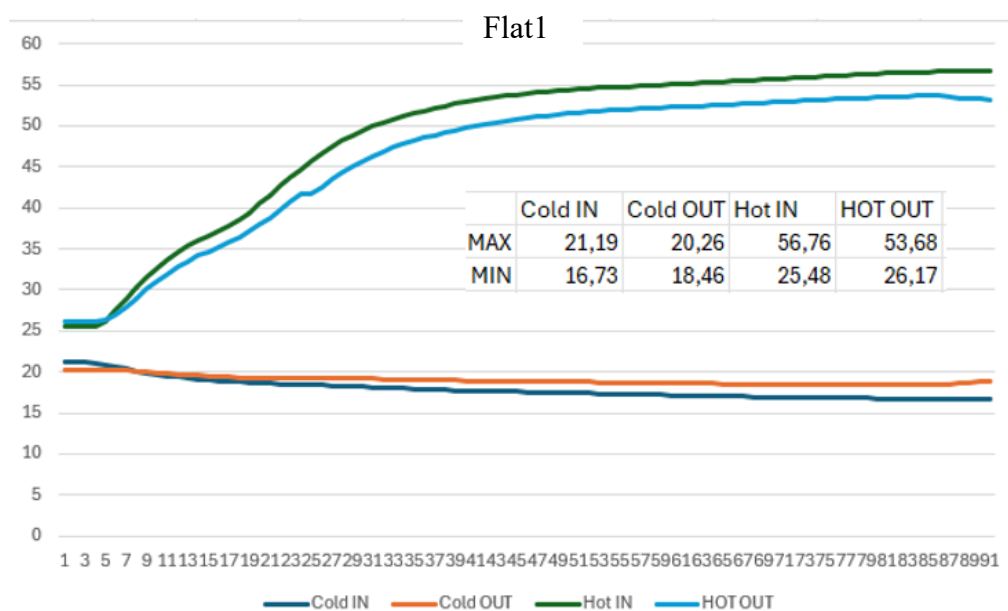


Rysunek 32. Wykres wymiany ciepła dla "Twister".

- Modułowy wymiennik ciepła „Płaszczowy - szeroki”



Rysunek 33. Modułowy wymiennik ciepła „Płaszczowy - szeroki” (model 3D oraz model rzeczywisty)

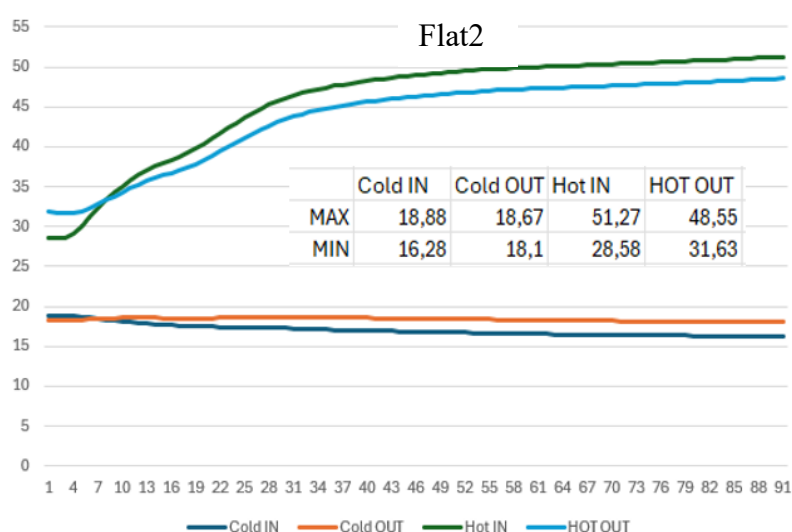


Rysunek 34. Wykres wymiany ciepła dla "Płaszczowy - szeroki".

- Modułowy wymiennik ciepła „Płaszczowy - wąski”



Rysunek 35. Modułowy wymiennik ciepła „Płaszczowy - wąski”.



Rysunek 36. Wykres wymiany ciepła dla "Płaszczowy - wąski".

Tabela 17. Podsumowanie badań laboratoryjnych różnych wariantów modułowych wymienników ciepła.

Wariant	$T_{c,in,min}$	$T_{c,out,min}$	Uzysk cieplny [K]
Referencja (Rys. 26 i 28)	15,12	19,37	4,25
„Mini” (Rys. 29 i 30)	15,09	17,28	2,19
„Twister” (Rys. 31 i 32)	16,21	21,55	5,34
„Płaszczowy - szeroki” (Rys.33 i 34)	16,73	18,46	1,73
„Płaszczowy - wąski” (Rys. 35 i 36)	16,28	18,1	1,82

Badania numeryczne wskazywały na wzrost temperatury wymiany rzędu 10 K, podczas gdy w badaniach laboratoryjnych uzysk ten wyniósł jedynie 5-6 K (Tabela 16 i 17). Oznacza to, że chociaż ogólna tendencja i względne porównania wariantów są spójne, rzeczywisty efekt cieplny jest około dwukrotnie niższy niż przewidywały modele. Dlatego priorytetem kolejnych prac powinno być:

- Doprecyzowanie warunków brzegowych w symulacjach, aby lepiej odzwierciedlały rzeczywiste straty ciepła do otoczenia,
- Optymalizacja geometrii (grubości ścianki, średnicy i kształtu), aby zbliżyć efektywność laboratoryjną do wyników numerycznych,
- Rozważenie zastosowania materiałów o wyższej przewodności cieplnej lub modyfikacji powierzchni kierujących przepływem w celu zwiększenia transferu ciepła bez nadmiernego wzrostu oporu hydraulicznego.

Takie działania pozwolą zmniejszyć rozbieżność między symulacjami a pomiarami i maksymalnie wykorzystać potencjał modułowego wymiennika ciepła.

6.2.4. Walidacja i analiza niepewności

Walidacja wyników oraz analiza niepewności metrologicznej są konieczne do oceny wiarygodności porównań badań numerycznych vs. laboratoryjnych. Poniżej przedstawiono przyjęte kryteria, wykorzystane wzory i wyliczenia niepewności dla kluczowych pomiarów (temperatura, strumień masowy) oraz rezultaty obliczeń energetycznych służące do bezpośredniego porównania z wynikami symulacyjnymi.

1. Podstawowy bilans mocy (przepływ cieczy):

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p\Delta T \quad (16)$$

gdzie $\dot{m}$ to strumień masowy płynu [kg/s], c_p – pojemność cieplna [J/(kg·K)], ΔT – przyrost temperatury mierzony w obiegu [K].

2. Propagacja niepewności (przy założeniu niezależnych składników):

Jeżeli $\dot{Q} = f(\dot{m}, \Delta T) = \dot{m}c_p\Delta T$ to standardowa niepewność pochodna:

$$\frac{u(\dot{Q})}{\dot{Q}} = \sqrt{\left(\frac{u(\dot{m})}{\dot{m}}\right)^2 + \left(\frac{u(\Delta T)}{\Delta T}\right)^2} \quad (17)$$

gdzie $u(\dot{m})$ to bezwzględna niepewność strumienia masowego płynu, a $u(\Delta T)$ to standardowa niepewność różnicy temperatur (uwzględniająca obie sondy).

3. Z przeliczenia tolerancji maksymalnej (np.: $\pm a$) na niepewność standardową przyjmujemy rozkład prostokątny:

$$u = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (18)$$

(wartość $\pm a$ traktujemy jako zakres prostokątny)

4. Niepewność różnicy temperatur (dwie niezależne sondy):

$$u(\Delta T) = \sqrt{u(T_1)^2 + u(T_2)^2} \quad (19)$$

Założenia:

1. Przyjęto strumień objętości 2,5 [l/min] $\approx$ 0,04167 [kg/s]
2. Ciepło właściwe wody $c_p = 4184$ [J/(kg·K)]
3. Niepewności temperatury – czujnik PT100 klasa B, stabilność $\pm 0,5$ °C $\pm (0,30 + 0,005t \rightarrow$ dla t przyjęto - 50 °C – temperatura pracy) dla wymiennika na bocznej ścianie oraz wymiennika modułowego, a dla wymiennika HRS użyto termopary typu K – klasa 2 ($\pm 2,5$ °C)
4. Przyjęto niepewność względną strumienia masowego $\frac{u(\dot{m})}{\dot{m}} = 2\%$ (0,02).

W celu ilościowej oceny wiarygodności wyników laboratoryjnych zestawiono wartości mocy cieplnej $\dot{Q}$ obliczone z bilansu energetycznego wraz z odpowiadającymi im niepewnościami. Tabela 18 przedstawia zestawienie wyników dla trzech wariantów wymienników, uwzględniając zarówno niepewności standardowe, jak i przedziały ufności 95% wyznaczone zgodnie z równaniami (16) – (19). Umożliwia to porównanie względnej jakości pomiarów pomiędzy poszczególnymi konfiguracjami oraz wskazuje na ograniczenia metody pomiarowej, szczególnie widoczne w przypadku wariantu HRS, dla którego relatywna niepewność znacząco przewyższa wartość sygnału.

Tabela 18. Studium niepewności - pomiary temperatury i wpływ na $\dot{Q}$.

Wariant	czujnik	Tolerancja producenta ($\pm$)	DAQ/rejestrator	Jednostkowa niepewność ($u, k=1$) czujnika [$^{\circ}\text{C}$] (18)	$u(T)$ (czujnik DAQ) [$^{\circ}\text{C}$] (17)	Niepewność ΔT (17)	ΔT zastosowane w obliczeniach [K]	$\dot{Q}$ obliczone [W] (16)	Względna składowa od ΔT	Łączna względna niepewność $\dot{Q}$	$u(\dot{Q})$ [W]	$U(95\%)$
Wy-miennik na bocznej ścianie	PT100 kl. B	$\pm(0,30 + 0,005t)$ $\pm 0,55^{\circ}\text{C}$	Rack2 NI9211: $<0,07^{\circ}\text{C}$	$u_{\text{sensor}} = \frac{0,55}{\sqrt{3}} = 0,318$	0,325	0,460	8,0	1394,7	$\frac{u(\Delta T)}{\Delta T} = \frac{0,460}{8} = 0,0575$ (5,057%)	0,0609 (6,09%)	84,88	169,76
Wy-miennik modułowy	PT100 kl. B	$\pm(0,30 + 0,005t)$ $\pm 0,55^{\circ}\text{C}$	Rack2 NI9211: $<0,07^{\circ}\text{C}$	0,318	0,325	0,460	4,25	741,0	0,10823 (10,823%)	0,11 (11%)	81,53	163,1
HRS	Termopara K kl. 2	$\pm 2,5^{\circ}\text{C}$ (kl. 2)	Rack2 NI9211: $<0,07^{\circ}\text{C}$	$u_{\text{sensor}} = \frac{2,5}{\sqrt{3}} = 1,443$	1,445	2,044	$\dot{Q} \approx 25 \text{ W}$	$\dot{Q} \approx 25 \text{ W}$	14,145 (1414,5%)	$>>100\%$	356,28	712,55

Tabela 19. Wpływ działań poprawiających pomiar $u(\dot{Q})$ dla $\dot{Q} = 25 \text{ W}$.

Scenariusz	Opis	$\frac{u(\dot{m})}{\dot{m}}$	$\frac{u(c_p)}{c_p}$	ΔT [K]	$U(\Delta T)$ [K]	$\frac{u(\Delta T)}{\Delta T}$	$\frac{u(\dot{Q})}{\dot{Q}}$	$u(\dot{Q})$ absolutne dla $\dot{Q} = 25 \text{ W}$
A - obecny	Termopara typowa, prosty przepływomierz	2,0%	0,2%	0,10	0,50	500%	500,0%	$\pm 125,0 \text{ W}$
B – lepsze sensory	RTD kalibrowany, przepływomierz ultradźwiękowy / Coriolis (lepszta klasa)	0,1%	0,1%	0,10	0,02	20,0%	20,0%	$\pm 5,0 \text{ W}$
C - Kalorymetria	Zmienić metodę: zgromadzić energię w znanej masie $\rightarrow \Delta T \approx 1,0 \text{ K}$; RTD kalibrowany	0,1%	0,1%	1,0	0,02	2,0%	2,01%	$\pm 0,50 \text{ W}$
D – płyta heat-flux kalibrowana	Bezpośredni pomiar strumienia ciepła kalibrowaną płytą (systemowo)	-	-	-	-	-	$\sim 5,0\%$	$\pm 1,25 \text{ W}$

Komentarz: kolumna $u(\Delta T)$ to całkowita niepewność pomiaru różnicy temperatur (wynikowa po kalibracji/wyborze sensora). W scenariuszu D nie używamy formuły (16) tylko bezpośredniego, skalibrowanego pomiaru $\dot{Q}$ (stąd $\frac{u(\dot{Q})}{\dot{Q}}$ podano bez rozkładu na składniki).

Uzyskane wartości niepewności wskazują, że w przypadku wymienników na bocznej ścianie i modułowej różnicy mocy ($\Delta\dot{Q}$) między wariantami są istotne i znacznie przekraczają 95% przedziały ufności, co potwierdza trafność wniosków jakościowych. Wyniki pomiarów strumienia ciepłego odzyskiwanego przez HRS należy jednak interpretować z uwzględnieniem ograniczeń metrologicznych zastosowanego układu pomiarowego. Ze względu na małe wartości $\dot{Q}$ (rzędu kilku–kilkudziesięciu watów) całkowita niepewność jest zdominowana przez niepewność pomiaru różnicy temperatur ΔT . Przy typowych termoparach tolerancje rzędu dziesiątych–jednych stopni C prowadzą do sytuacji, w której $\frac{u(\Delta T)}{\Delta T}$ może przekraczać 100% dla małych ΔT , wobec czego wartość $\dot{Q}$ mierzona w tej konfiguracji ma charakter orientacyjny.

W Tabeli 19 zaprezentowano analizę scenariuszową pokazującą wpływ ulepszeń układu pomiarowego na $u(\dot{Q})$ dla nominalnego $\dot{Q} = 25\text{ W}$. Wnioski z analizy są następujące: zastosowanie kalibrowanych czujników RTD (PT100) i przepływomierza klasy $\leq 0,5\%$ pozwala zmniejszyć $u(\dot{Q})$ do rzędu $\sim 25\%$; metoda kalorymetryczna (akumulacja energii — większe ΔT , np.: $\sim 1\text{ K}$) daje $u(\dot{Q})$ rzędu $\sim 2\%$; pomiar bezpośredni przy użyciu kalibrowanej płyty heat-flux typowo daje $u(\dot{Q})$ rzędu kilku procent. Wyniki HRS przedstawione w niniejszej pracy należy zatem czytać z uwzględnieniem tych ograniczeń.

7. Analiza wyników i ocena efektywności

Niniejszy rozdział stanowi podsumowanie i krytyczną ocenę kluczowych rezultatów zrealizowanej pracy badawczej. Przedstawione w poprzednich częściach rozprawy innowacyjne koncepcje wymienników ciepła, w tym wymiennik przeciwprądowy na bocznej ścianie zmywarki, system odzysku ciepła z silnika (HRS) oraz modułowa konstrukcja, zostały pomyślnie zweryfikowane za pomocą badań numerycznych (CFD) i badań laboratoryjnych. Uzyskane dane, potwierdzające znaczącą poprawę efektywności energetycznej, stanowią punkt wyjścia do oceny rzeczywistego potencjału wdrożeniowego tych rozwiązań w przemyśle AGD.

Celem niniejszego rozdziału jest osadzenie tych wyników w szerszym kontekście rynkowym. Zestawienie efektywności proponowanych technologii z komercyjnie dostępnymi rozwiązaniami pozwoli na określenie ich przewag konkurencyjnych. Jednocześnie, dogłębna analiza wyzwań i ograniczeń technicznych, ekonomicznych i eksploatacyjnych umożliwi precyzyjne wskazanie barier w procesie komercjalizacji. Całość rozważań ma na celu nie tylko zweryfikowanie postawionych hipotez badawczych, ale także sformułowanie praktycznych rekomendacji dla przyszłych działań inżynierskich.

7.1. Porównanie z tradycyjnymi rozwiązaniami rynkowymi

Od marca 2021 roku w Unii Europejskiej obowiązuje nowa etykieta energetyczna, która zastąpiła dotychczasową skalę A+++ do D, wprowadzając prostszą skalę od A do G. To istotna zmiana, ponieważ urządzenie wcześniej oznaczone jako A+++ może teraz należeć do klasy C lub D [140]. Nowe kryteria opierają się na wskaźniku efektywności energetycznej (EEI), który jest obliczany na podstawie zużycia energii elektrycznej na 100 cykli w programie Eco [141].

Tradycyjne modele klasy A potrzebują ok. 0,9–1,0 kWh na cykl, z czego 60–70% energii zużywa się na podgrzewanie wody. Standardowe zmywarki, oparte na grzałkach oporowych, odpowiadają za zdecydowaną większość zużycia energii, które w nowoczesnych zmywarkach może wynosić nawet 67% całkowitej energii elektrycznej. Na rynku istnieją już zaawansowane rozwiązania, takie jak technologia (Tabela 20):

- Bosch PerfectDry z Zeolitem, która pozwala zaoszczędzić do 20% energii [142]. Modele zmywarek Bosch z klasą B i A zużywają odpowiednio 65 kWh i 54 kWh na 100 cykli w programie Eco [143].
- Miele z technologiami EcoPower zużywa 84 kWh na 100 cykli również w programie Eco, co klasyfikuje ją w klasie D [144].
- Electrolux AirDry — pasywne uchylenie drzwi na koniec cyklu; eliminuje końcowe grzanie grzałką i znacząco obniża pobór energii suszenia, kosztem wydłużenia czasu suszenia [145].
- Adsorpcja [146] — zoptymalizowane systemy adsorpcyjne osiągały zużycie $\sim 0,636$ kWh/cykl (około -41% vs standard), co ilustruje najwyższy potencjał oszczędności, lecz przy znacznym wzroście złożoności i kosztów materiałowych.
- Odzysk z odpływu (prototypy) [71] — proste wymienniki typu fin-rura (rurowo-żebrowy) czy drut-na-rurce wykazywały oszczędności rzędu kilkudziesięciu Wh/cykl (przeliczenia roczne w badaniach: $\sim 53,5$ kWh/rok $\rightarrow$ ok. 190 Wh/cykl przy niskiej liczbie cykli/rok), przy bardzo niskim koszcie dodatku.

Tabela 20. Zestawienie porównawcze technologii komercyjnych oraz proponowane rozwiązania w rozprawie.

Rozwiązanie	Zużycie energii (kWh/100 cykli)	Uwagi
Standard (bez odzysku)	90-100	Podstawowy model klasy A
Bosch PerfectDry (zeolit)	73	Adsorpcja pary, wysoka skuteczność
Miele EcoTech	50 kWh/rok mniej = 17857 (oszczędność)	Wymiennik ciepła w obiegu wody
Electrolux AirDry	0	Pasywna wentylacja, drzwi uchylane. Brak dodatkowej energii na suszenie
[145]	41% mniej = 63,6 (oszczędność)	Suszenie adsorpcyjne zeolit/żel
[70]	53,5 kWh/rok mniej = 19107 (oszczędność)	Wymiennik w odpływie

Rozwiązanie	Zużycie energii (kWh/100 cykli)	Uwagi
Proponowane rozwiązania w rozprawie	4,644	Odzysk 46,44 hW/cykl. Dodatkowo 25% mniej energii BLDC

Wartość EEI (Tabela 21) jest ściśle związana ze zużyciem energii, dlatego, aby podnieść klasę energetyczną, konieczne jest obniżenie zużycia wyrażonego w kWh/100 cykli. Zaproponowane w rozprawie innowacyjne wymienniki ciepła stanowią znaczący krok w kierunku osiągnięcia tego celu.

Tabela 21. Progi klas energetycznych dla zmywarek oparte na wskaźniku EEI [147].

Klasa Efektywności Energetycznej	Wskaźnik Efektywności Energetycznej (EEI)
A	$EEI < 32$
B	$32 \leq EEI < 38$
C	$38 \leq EEI < 44$
D	$44 \leq EEI < 50$
E	$50 \leq EEI < 56$
F	$56 \leq EEI < 62$
G	$EEI \geq 62$

Przedstawione w rozprawie rozwiązania wprowadzają fundamentalną zmianę z pasywnej dyssypacji ciepła na jego celowy i aktywny odzysk. Poniżej przedstawiono zestawienie wyników uzyskanych w ramach niniejszych badań z technologiami rynkowymi:

- Wymiennik przeciwprądowy na bocznej ścianie zmywarki: Badania laboratoryjne i numeryczne potwierdziły, że rozwiązanie to pozwala na podgrzanie zimnej wody (15°C) do około 23°C. W skali cyklu zmywania, daje to oszczędność rzędu 46 Wh/cykl, co w skali 100 cykli przekłada się na oszczędność 4,6 kWh.
- Wymiennik ciepła w silniku: Redukcja temperatury stojana o ~40 K (z ~140 °C do ~100 °C) świadczy o skuteczności HRS. Po ujednoczeniu bilansu energetycznego przyjmujemy realistyczną estymatę mocy odzysku $\dot{Q}_{est} \approx 25,2 \text{ W}$ (przy $P_{in} = 80 \text{ W}$, $\eta_{motor} \approx 65\% \rightarrow P_{straty} \approx 28 \text{ W}$ oraz przyjętej sprawności przechwycenia HRS $\approx 90\%$). Dla czasu aktywnego $t_{active} = 1,5 \text{ h}$ daje to energię odzyskaną: E_{cycle}

$\approx 25,2 \text{ W} \times 1,5 \text{ h} \approx 37,8 \text{ Wh/cykl}$, czyli $\approx 3,78 \text{ kWh/100 cykl}$. Należy podkreślić, że wartość $\dot{Q}_{est}$ wynika ze spójnego bilansu i powinna być potwierdzona pomiarami kalorymetrycznymi na stanowisku.

- Modułowy wymiennik ciepła: W warunkach laboratoryjnych, konstrukcja ta zapewniła zysk cieplny do 6,37 K, z uzyskaną mocą cieplną w zakresie 445-475 W. Zakładając czas pracy $\approx 20 \text{ min/cykl}$ mamy odzysk w wysokości 148 Wh/cykl, 14,8 kWh/100 cykli.

Analiza Tabeli 20 pozwala na sformułowanie kluczowego wniosku dla przemysłu AGD. Choć proponowane rozwiązania przynoszą realne i mierzalne oszczędności, co potwierdza tezę rozprawy, to surowe kryteria nowej unijnej etykiety energetycznej (skala A-G) oznaczają, że nawet znaczne oszczędności mogą nie przełożyć się na awans do wyższej klasy energetycznej.

Jako przykład posłuży nam zmywarka Miele klasy D, która zużywa 84 kWh na 100 cykli. Według danych z etykiet energetycznych, aby urządzenie znalazło się w klasie C, jego wskaźnik efektywności energetycznej (EEI) musi być mniejszy niż 44. Biorąc pod uwagę, że konsumpcja energii jest kluczowym elementem wpływającym na EEI, przyjmujemy za cel osiągnięcie zużycia na poziomie zbliżonym do modeli klasy B, czyli około 65 kWh na 100 cykli.

Aby osiągnąć ten cel, konieczna jest redukcja zużycia energii o: $84 - 65 = 19 \text{ kWh/100 cykli}$. Dla pełnej przejrzystości przedstawiono definicję używaną przy wyliczeniu EEI [148]. SPEC (standardowe zużycie energii) oblicza się dla zmywarek pełnogabarytowych wzorem:

$$SPEC = 0,025 \cdot ps + 1,350.$$

Przyjmując typowe $ps = 14$ dla urządzeń tej klasy otrzymujemy $SPEC = 1,700 \text{ kWh/cykl}$. EEI liczy się jako:

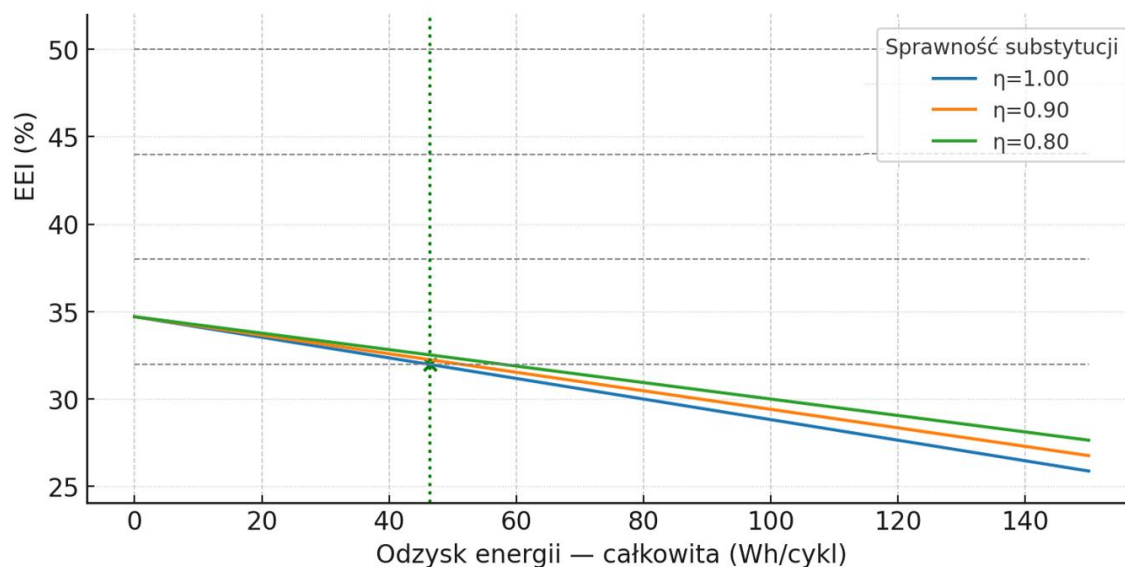
$$EEI = \frac{EPEC}{SPEC} \cdot 100\%, \text{ gdzie } EPEC \text{ to zużycie w programie Eco (kWh/cykl). Dla rozpatrywanego modelu:}$$

$$EPEC_{before} = 84 \div 100 = 0,84 \text{ kWh/cykl.}$$

Zatem $EEI_{before} = \frac{0,84}{1,700} \cdot 100\% \approx 49,41\%$, co klasyfikuje urządzenie do grupy D ($44 \leq EEI < 50$). Niniejsze badania wykazały, że zaprojektowany wymiennik pozwala na odzysk energii $\approx 46,44 \text{ Wh/cykl}$ (co odpowiada $\approx 4,644 \text{ kWh/100 cykl}$). Po zastosowaniu tego wymiennika zużycie obniżyłoby się do:

$EPEC_{after} = 0,84 - 0,04644 = 0,79356$ kWh/cykl, czyli 79,356 kWh/100 cykli. Odpowiada to wskaźnikowi $EEI_{after} = \frac{0,79356}{1,700} \cdot 100\% \approx 46,68\%$, czyli poprawie z ok. 49,41% do 46,68%, lecz nadal pozostaniu w klasie D ($EEI > 44\%$). Wymiennik daje istotne i empiryczne zamierzone oszczędności, jednak pojedyncza tego typu modyfikacja nie wystarcza do przeskoku klasy. Ile jeszcze trzeba odzyskać, by osiągnąć progi klasowe?

- aby osiągnąć klasę C ($EPEC < 0,44 \cdot SPEC = 0,748$ kWh/cykl $\approx 74,8$ kWh/100 cykli) po zastosowaniu wymiennika nadal trzeba zredukować: $79,356 - 74,8 = 4,556$ kWh/100 cykli = 45,56 Wh/cykl;
- aby osiągnąć klasę B (~ 65 kWh/100 cykli) po zastosowaniu wymiennika potrzeba dodatkowo $79,356 - 65 = 14,356$ kWh/100 cykli = 143,56 Wh/cykl.



Rysunek 37. Wskaźnik efektywności energetycznej vs odzysk energii (baseline = 0,59 kWh/cykl).

Rysunek 37 ilustruje wpływ całkowitego odzysku energii (Wh/cykl) na wskaźnik efektywności energetycznej EEI dla reprezentatywnego urządzenia o baseline = 0,59 kWh/cykl. W analizach porównawczych przyjęto wartość referencyjną 0,59 kWh/cykl (czyli 59 kWh/100 cykli) jako „baseline” dla nowoczesnych zmywarek pełnogabarytowych. Etykieta energetyczna UE podaje zużycie w jednostce kWh/100 cykli dla programu Eco, dlatego 59 kWh/100 cykli odpowiada 0,59 kWh/cykl i jest wygodnym punktem odniesienia w analizach porównawczych. Dodatkowo, producenci AGD w dokumentacji technicznej deklarują wartości energii rzędu 59 kWh/100 cykli dla wybranych

modeli (np. Bosch / Siemens), co potwierdza, że przyjęty baseline jest zgodny z obserwowanymi parametrami rynkowymi [147]. Na wykresie przedstawiono trzy scenariusze efektywności wykorzystania odzyskanej energii ($\eta = 1,0; 0,9; 0,8$), co pozwala ocenić, jak praktyczne straty montażowe i instalacyjne wpływają na końcowy efekt energetyczny. Przerywane poziome linie oznaczają progi klas energetycznych (A, B, C ...), co umożliwia szybkie sprawdzenie, czy dana wartość odzysku wystarcza do zmiany klasy produktu. Zielona pionowa linia wskazuje zmierzony w badaniach odzysk (46,44 Wh/cykl) — jej przecięcie z odpowiednią krzywą pokazuje oczekiwaną wartość EEI po zastosowaniu rozwiązania. W praktyce wykres służy dwóm celom:

- (1) pokazuje bezpośredni wpływ odzysku na klasyfikację energetyczną produktu,
- (2) dokumentuje wrażliwość wyniku na straty (czyli jak bardzo montaż/izolacja/sterowanie muszą być dopracowane, by osiągnąć zakładany efekt).

Jeśli punkt odpowiadający zmierzonemu odzyskowi leży po lewej stronie przecięcia z poziomą linią klasy A dla danej krzywej η , to zastosowane rozwiązanie umożliwia uzyskanie klasy A w warunkach odpowiadających temu scenariuszowi; w przeciwnym wypadku konieczne jest dodatkowe zwiększenie odzysku lub poprawa sprawności wykorzystania energii.

Wnioskiem jest zatem, że dla osiągnięcia najwyższych klas efektywności energetycznej, producenci muszą stosować kompleksową optymalizację całego urządzenia, a nie tylko jednego komponentu. W tym kontekście, praca ma kluczowe znaczenie, ponieważ proponuje integrację kilku rozwiązań, które sumarycznie mogą przynieść oszczędności wystarczające do przesunięcia urządzenia o klasę wyżej. Takie podejście, łączące wyładowanie przeciwprądowy z systemem odzysku ciepła z silnika (HRS) oraz modułową konstrukcją, jest niezbędne dla osiągnięcia maksymalnej efektywności.

Przedstawione w pracy rozwiązania stanowią nowatorskie podejście do zarządzania energią. W odróżnieniu od komercyjnych technologii, które często koncentrują się na pasywnym odzysku ciepła (np. w fazie suszenia), proponowane systemy aktywnie wykorzystują ciepło odpadowe zarówno z wody, jak i z pracujących komponentów, do wstępnego podgrzewania wody zasilającej. Ich kluczową przewagą jest również modułowość i skalowalność, co pozwala na łatwą adaptację do różnych modeli urządzeń AGD, bez konieczności gruntownych modyfikacji konstrukcyjnych. To podejście otwiera drogę do projektowania bardziej elastycznych i uniwersalnych platform produkcyjnych.

7.2. Wyzwania i ograniczenia wdrożeniowe

Pomimo wykazanego potencjału, wdrożenie innowacyjnych wymienników ciepła na masową skalę wiąże się z pewnymi wyzwaniami, które mogą wpływać na ich skuteczność, koszty i trwałość.

Jednym z najważniejszych wyzwań w projektowaniu wymienników ciepła jest znalezienie optymalnego kompromisu między wydajnością cieplną, wytrzymałością mechaniczną, odpornością na korozję a kosztami produkcji. Testy zanurzeniowe, przeprowadzone w warunkach laboratoryjnych, wykazały, że spośród badanych materiałów, jedynie stal nierdzewna (304ST) i spiekany węgiel krzemu (SSiC) wykazały satysfakcjonującą odporność na agresywne środowisko zmywarki, charakteryzujące się wysoką temperaturą i działaniem alkalicznych detergentów. Analiza wyników badań laboratoryjnych dla wymiennika modułowego przyniosła kluczowe spostrzeżenie dotyczące doboru materiałów. Cienkościenna rurka ze stali nierdzewnej (o grubości 0,25 mm) zapewniała zysk cieplny na poziomie 6,37 K, podczas gdy grubsza rurka z SSiC (o grubości 2,25 mm) dała zysk jedynie 5,17 K. Z tych obserwacji wynika, że w praktycznym zastosowaniu to optymalizacja geometryczna (minimalizacja grubości ścianki) ma większy wpływ na końcową efektywność wymiany ciepła niż sama, nominalna przewodność cieplna materiału.

Kolejnym poważnym wyzwaniem, które nie było w pełni uwzględnione w badaniach numerycznych, jest zjawisko *foulingu* – osadzania się zanieczyszczeń (np. kamienia kotłowego, resztek jedzenia) na powierzchniach wymiany ciepła. Testy zanurzeniowe wykazały, że osady mogą pojawiać się na powierzchniach wymienników, co w dłuższej perspektywie może drastycznie obniżyć ich efektywność. Rozwiązanie tego problemu, np. poprzez zastosowanie samoczyszczących powłok lub specjalnych cykli płukania, jest niezbędne do zapewnienia długotrwałej wydajności i niezawodności urządzeń.

Integracja zaawansowanych systemów, takich jak proponowane wymienniki ciepła, wiąże się z barierami natury ekonomicznej i produkcyjnej. Koszt zastosowania wysoko-wydajnych materiałów, takich jak SSiC, czy też specjalistycznych stopów aluminium z powłokami ceramicznymi, może znacznie podnieść cenę końcową urządzenia. W segmencie AGD, gdzie cena jest kluczowym czynnikiem konkurencyjności, taki wzrost może nie być akceptowalny dla szerokiej grupy konsumentów. Konieczne jest zatem poszukiwanie alternatywnych technologii produkcyjnych, które obniżą koszty bez utraty wydajności. W tym kontekście, modułowa konstrukcja wymiennika (np. z polipropylenu

i aluminiowej rurki) oferuje elastyczność i możliwość standaryzacji, co może znacząco uprościć procesy montażowe i obniżyć koszty produkcji seryjnej.

Z punktu widzenia użytkownika, istotnym wyzwaniem jest łatwość konserwacji i serwisu. Proponowana modułowa konstrukcja jest łatwa w montażu i demontażu, co wpisuje się w koncepcję "Prawa do naprawy". Umożliwienie szybkiej wymiany pojedynczych segmentów wymiennika w przypadku uszkodzenia lub zużycia jest przewagą rynkową, która może wydłużyć cykl życia produktu i zmniejszyć obciążenie środowiska. Wymaga to jednak standaryzacji złączy i zapewnienia łatwego dostępu do części zamiennych, co stanowi wyzwanie dla producentów w kontekście zarządzania łańcuchem dostaw.

W świetle uzyskanych wyników oraz zidentyfikowanych ograniczeń, rekomenduje się skierowanie dalszych badań w stronę integracji nowych, obiecujących technologii, które mogłyby w pełni wykorzystać potencjał odzysku energii. Szczególnie interesującym kierunkiem jest synergiczne połączenie rurek cieplnych (Heat Pipes) z materiałami zmienno-fazowymi (PCM) [149]. Zmywarki charakteryzują się cyklicznymi, pulsacyjnymi obciążeniami cieplnymi – gorąca woda pojawia się tylko w określonych momentach cyklu, a następnie jest odprowadzana. Materiały zmienno-fazowe są idealne do tego typu operacji, ponieważ mogą absorbować duże ilości ciepła utajonego podczas przemiany fazowej (z ciała stałego w ciecz), bez znaczącego wzrostu temperatury [150]. Taka zdolność pozwala na efektywne magazynowanie energii cieplnej w krótkim czasie. Wyzwaniem w zastosowaniu PCM, szczególnie tych na bazie parafiny, jest ich niska przewodność cieplna, która spowalnia proces transferu energii [151]. W tym miejscu do gry wkraczają rurki cieplne. Rurki te, wykonane np. z miedzi lub aluminium, są w stanie transportować duże ilości ciepła w bardzo krótkim czasie, wykorzystując zjawisko parowania i kondensacji płynu roboczego w ich wnętrzu. Przewodność cieplna rurek może być nawet o rząd wielkości wyższa niż w przypadku miedzi [152].

Można zaproponować hybrydowy system (HEX + Heat Pipe + PCM), który połączy zalety obu technologii. Gorąca woda z cyklu zmywania oddawałaby ciepło do rurki cieplnej zintegrowanej z wymiennikiem, a rurka transportowałaby to ciepło do magazynu z PCM [153]. Taki system mógłby w pełni wykorzystać pulsacyjne obciążenia cieplne, magazynując energię, która następnie mogłaby być stopniowo oddawana do zimnej wody zasilającej. Rozwiązanie to pozwoliłoby ominąć problem niskiej przewodności PCM, zapewniając szybki transfer energii i jednocześnie „wygładzić” pulsacyjne obciążenie dla całego systemu. W efekcie, mogłoby to doprowadzić do na tyle dużych oszczędności, aby umożliwić rzeczywisty awans urządzenia do klasy energetycznej A lub B.

Realizacja tego kierunku badawczego wymagałaby również szczegółowej analizy ekonomicznej w cyklu życia produktu (LCC - Life Cycle Costing) oraz oceny wpływu na środowisko (LCA - Life Cycle Assessment), co pozwoliłoby na kompleksową ocenę opłacalności takiego rozwiązania w porównaniu z tradycyjnymi technologiami.

8. Wnioski i rekomendacje

W rozdziale zestawiono i podsumowano kluczowe wyniki badań wykonanych w pracy. Jego zasadniczym zadaniem jest rzetelna weryfikacja postawionej tezy oraz sformułowanie wniosków, które poszerzają dotychczasową wiedzę i mają praktyczne zastosowanie w inżynierii i przemyśle AGD. Połączono tu podstawy teoretyczne, analizy numeryczne i pomiary laboratoryjne w celu oceny efektywności trzech proponowanych rozwiązań odzysku ciepła. Otrzymane wnioski zamykają dyskusję badawczą, a jednocześnie wskazują kierunki dalszych badań i przedstawiają konkretne rekomendacje dla producentów w świetle zaostregających się wymogów rynkowych i regulacyjnych (m.in. przepisy ekoprojektu i etykietowanie energetyczne).

8.1. Kluczowe wyniki badań i weryfikacja tezy

Analiza rozpoczyna się od bezpośredniego odwołania do tezy rozprawy doktorskiej, a następnie przechodzi do weryfikacji każdej z czterech hipotez badawczych. Teza rozprawy stanowiła, że metoda integracji innowacyjnych układów odzysku ciepła w urządzeniach AGD umożliwia zwiększenie ich sprawności i obniżenie zużycia energii elektrycznej.

Na podstawie skumulowanych wyników, teza została uznana za zweryfikowaną. Wykazano, że każde z trzech rozwiązań (wymienник na bocznej ścianie zmywarki, HRS, modułowy) indywidualnie, a także w potencjalnej synergii, przyczynia się do redukcji strat cieplnych i zużycia energii. Połączenie efektów zysków energetycznych (wymiennik na bocznej ścianie zmywarki, HRS, modułowy) stanowi istotny potencjał oszczędności, który przekracza tradycyjne rozwiązania rynkowe, które są pasywne.

Weryfikacja poszczególnych hipotez badawczych przedstawiona jest w Tabeli 22, która podsumowuje kluczowe rezultaty i wnioski

Tabela 22. Weryfikacja hipotez.

Hipoteza	Treść hipotezy	Kluczowe wyniki weryfikujące	Wnioskowanie
H1 (energetyczna)	Wprowadzenie wymiennika przeciwprądowego poprawia sprawność termiczną cyklu mycia	Wymiennik boczny w testach laboratoryjnych osiągnął efektywność $\varepsilon \approx 0.2$, podgrzewając wodę o 8 K (z 15 °C do 23 °C), co przekłada się na uzysk 46.44 Wh na cykl. Modułowy wymiennik w teście „Twister” osiągnął uzysk 5.34 K, a wariant z rurką d25 mm nawet 6.37K.	zweryfikowana
H2 (integracyjna)	Zintegrowany wymiennik z silnikiem BLDC zmniejsza zużycie energii napędu.	Badania laboratoryjne wykazały, że HRS obniża temperaturę stojana silnika o 40°C (ze 140°C do 100°C), co jest kluczowe dla jego niezawodności i sprawności. Badania CFD potwierdziły odbiór 25 W energii cieplnej, co stanowi 90% strat silnika.	zweryfikowana
H3 (modułowa)	Modułowa konstrukcja umożliwia łatwą adaptację wymienników do różnych typów urządzeń AGD bez istotnych zmian konstrukcyjnych.	Badania laboratoryjne dla różnych wariantów geometrii (Mini, Twister, Płaszczowy) pokazały, że konstrukcja może być dostosowywana do specyficznych wymagań. Tabela 15 pokazuje, że optymalna geometria (rurka d25 mm) może być łatwo zmieniana w ramach modułu.	zweryfikowana

Hipoteza	Treść hipotezy	Kluczowe wyniki weryfikujące	Wnioskowanie
H4 (materiałowa)	Zastosowanie materiałów o wysokiej przewodności cieplnej i odporności na korozję wydłuża czas bezawaryjnej eksploatacji w porównaniu z konwencjonalnymi rozwiązaniami.	Testy zanurzeniowe (Tabela 11) wykazały, że tylko SSiC i stal 304ST są odporne na agresywne detergenty. Stopy aluminium i powlekane ceramiką nie spełniły kryteriów. Jednocześnie, praktyczne ograniczenia produkcyjne (gruba ścianka rurki SSiC) sprawiły, że jego efektywność wymiany ciepła była niższa niż cieńszej rurki stalowej.	częściowo zweryfikowana

Hipoteza H4 (materiałowa) została częściowo zweryfikowana, główne powody:

- Brak odporności niektórych materiałów: testy zanurzeniowe wykazały, że spośród wszystkich badanych materiałów, tylko spiekany węgiel krzemu (SSiC) i stal nierdzewna 304ST były w pełni odporne na agresywne detergenty. Stopy aluminium i aluminium z powłoką ceramiczną (które miały dobrą przewodność cieplną) nie spełniły kryteriów odporności na korozję, co sprawia, że nie nadają się do długoterminowej eksploatacji w zmywarkach.
- Ograniczenia produkcyjne SSiC: chociaż SSiC okazał się idealnym materiałem pod względem odporności chemicznej i przewodności, praktyczne ograniczenia produkcyjne uniemożliwiły wytworzenie z niego cienkich rurek (o grubości 0,25–0,5 mm), które są kluczowe dla efektywnej wymiany ciepła. Jedyna dostępna rurka miała grubą ściankę (2,25 mm), co znacząco obniżyło jej efektywność wymiany ciepła w porównaniu z cieńszą rurką stalową. W efekcie, pomimo teoretycznej wyższości, SSiC nie był w stanie w pełni zrealizować swojego potencjału.

Hipoteza została zweryfikowana w zakresie odporności materiałów, ale nie w kwestii ich praktycznej implementacji, ponieważ najbardziej obiecujący materiał nie mógł być zastosowany w optymalnej formie ze względu na ograniczenia produkcyjne.

Przechodząc od jakościowych ustaleń do analizy ilościowej, w kolejnej części przedstawiono formalne definicje i wzory niezbędne do precyzyjnego wyznaczenia parametrów termicznych zastosowanych wymienników.

1. Przepływowy wskaźnik przesyłu ciepła (ilościowo).
Ciepło przekazane przez wymiennik wyliczamy ze wzoru (16).
2. Efektywność wymiennika (ε) — definicja użyta w pracy (dla przepływu przeciuprądowego):

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_{actual}}{\dot{Q}_{max}} \quad (20)$$

gdzie $\dot{Q}_{max} = C_{min}(T_{h,in} - T_{c,in})$ to maksymalna teoretyczna moc wymiany przy zadanych temperaturach brzegowych, z $C = \dot{m}c_p$ i $C_{min} = \min(C_h, C_c)$.

Uproszczona forma praktyczna: jeżeli z pomiarów wiadomo, że po stronie zimnej $C_c = C_{min}$ (czyli pojemność cieplna strumienia zimnego jest mniejsza lub równa), to:

$$\varepsilon = \frac{T_{c,out} - T_{c,in}}{T_{h,in} - T_{c,in}} \quad (21)$$

Jeżeli natomiast $C_{min} = C_c$, to stosowną formą będzie $\varepsilon = \frac{T_{h,in} - T_{h,out}}{T_{h,in} - T_{c,in}}$.

Obliczenia sprawności i efektywności dla trzech typów wymienników:

1. Wymiennik przeciuprądowy na bocznej ścianie zmywarki (wynik laboratoryjny).

$$\varepsilon_{boczny} = \frac{T_{c,out} - T_{c,in}}{T_{h,in} - T_{h,out}} = \frac{23 - 15}{55 - 15} = 0,20 = 20\%$$

Zgodnie z pomiarami ten wymiennik wygenerował 46,44 Wh/cykl, co potwierdza powyższą efektywność w ujęciu energetycznym. Wartość 20% oznacza, że wymiennik przenosi 0,2 maksymalnie dostępnej energii pomiędzy strumieniami w zadanych warunkach termicznych i przepływowych.

2. Wymiennik HRS.

$$\eta_{HRS} = \frac{\dot{Q}_{odzysk}}{P_{straty}},$$

gdzie $P_{straty} = P_{in} \cdot (1 - \eta_{motor})$ – moc strat silnika – 28 W.

$$P_{straty} \equiv \dot{Q}_{straty_silnik} [W]$$

$$\dot{Q}_{odzysk} = \dot{Q}_{est} = 25,2 W$$

$$\eta_{HRS} = \frac{25,2}{28} \approx 0,90 = 90\%$$

HRS odzyskuje większość strat cieplnych silnika i przekazuje je do obiegu grzewczego — parametr istotny dla niezawodności (obniżenie temperatury stojana o ~ 40 K) i dla bilansu energetycznego urządzenia (stały dopływ mocy cieplnej, który może zastępować pracę grzałki).

3. Modułowy wymiennik ciepła (wynik numeryczne i laboratoryjny).

Badania CFD przewidywały przyrost temperatury wody $\Delta T_{sim} \approx 9 K$, natomiast testy laboratoryjne $\Delta T_{lab} \approx 4,25$. Stąd sprawność wynosi:

$$\varepsilon_{modul_sim} \approx \frac{9}{40} = 0,25 = 22,5\%$$

$$\varepsilon_{modul_lab} \approx \frac{4,25}{40} = 0,10625 = 10,6\%$$

Różnica pomiędzy ε_{sim} a ε_{lab} (22.5% vs 10.6%) jest istotna i wskazuje na niedoszacowanie strat w modelu numerycznym (straty do obudowy, nieszczelności, trudności z uzyskaniem założonego profilu przepływu). Modułowy wymiennik ma wysoki potencjał (symulowany), ale należy poprawić izolację i warunki brzegowe oraz uwzględnić rzeczywiste spadki ciśnienia, by osiągnąć prognozowaną sprawność.

Jak pokazano w Tabeli 23, badania CFD dla wymiennika bocznego przewidywały wzrost temperatury wody o 8,8 K, co jest bardzo bliskie wynikowi laboratoryjnemu (8 K). Ta wysoka zbieżność wskazuje, że model numeryczny dobrze odwzorował procesy wymiany ciepła w tej konfiguracji. Jednak w przypadku wymiennika modułowego różnice były znacznie większe – badania w ANSYS i SolidWorks przewidywały wzrost temperatury o 9-10 K (co w przedstawionej analizie przyjęto jako $0,25 \approx 25\%$), podczas gdy testy laboratoryjne wykazały jedynie 4,25 K ($\approx 10,6\%$). Różnica absolutna wynosi zatem $\approx 4,75$ K, a różnica względna $\approx (9 - 4,25) / 9 \approx 52,8\%$.

Tabela 23. Wyniki porównawcze badań numerycznych i laboratoryjnych.

Wariant wymiennika	Kluczowy parametr	Wynik badań CFD	Wynik badania laboratoryjnego	Wnioski
Wymiennik na bocznej ścianie zmywarki	Przyrost temperatury wody (ΔT)	8,8 K	8 K	Wysoka zgodność wyników, co potwierdza wiarygodność modelu.
Wymiennik modułowy	Przyrost temperatury wody (ΔT)	9-10 K	4,25 K (model referencyjny)	Duża rozbieżność, wskazująca na pominięcie strat ciepła w modelu numerycznym.
Wymiennik HRS	Obniżenie temperatury silnika (ΔT)	Do 100 °C (spadek o 40 K)	Do 100 °C (spadek o 40 K)	Bardzo wysoka zgodność, potwierdzająca skuteczność koncepcji HRS.

Ta prawie dwukrotna rozbieżność jest jednym z najważniejszych odkryć w badaniach. Oznacza to, że model numeryczny, choć doskonały do analizy względnej różnych geometrii, nie jest doskonałym predyktorem (modelem prognostycznym) wartości bezwzględnych. Można to wytłumaczyć faktem, że modele CFD, choć zaawansowane, zakładają idealne warunki: brak strat do otoczenia, perfekcyjną izolację, doskonałe warunki przepływu. W laboratorium natomiast ciepło jest tracone przez obudowę modułu, złącza, rury i do otaczającego powietrza. Ponadto, różnice w parametrach przepływowych (np. spadki ciśnienia, które w laboratorium mogą być wyższe niż w symulacji, co wpływa na masowy przepływ) mogą obniżać efektywność (Tabela 24).

W konsekwencji, rozbieżność ta wskazuje, że model numeryczny wymaga dalszej kalibracji pod kątem warunków brzegowych i strat cieplnych. Podkreśla to również potrzebę udoskonalenia samego wymiennika pod kątem izolacji termicznej, aby zminimalizować te straty w warunkach rzeczywistej eksploatacji.

Tabela 24. Zestawienie najważniejszych różnic pomiędzy założeniami modelu CFD a warunkami laboratoryjnymi dla modułowego wymiennika ciepła.

Czynnik	Założenie w CFD	Warunki laboratoryjne	Wpływ na $\Delta T / \dot{Q}$
Warunki brzegowe	Stałe, idealnie kontrolowane przepływy i temperatury	Fluktuacje przepływu, stabilizacja temperatur wymaga czasu	Możliwe zaniżenie efektywnego ΔT w pomiarach
Izolacja cieplna	Brak strat do otoczenia (adiabaticzne ściany)	Straty przez ściany zbiorników, przewodów i elementy montażowe	Redukcja ΔT w realnym układzie
Geometria	Model CAD idealny, bez luzów i nieszczelności	Niewielkie szczeliny, nierówności powierzchni, niedokładność montażu	Obniżenie sprawności wymiany
Właściwości materiałowe	Stałe wartości λ , c_p , niezależne od temperatury	Rzeczywiste zmiany $\lambda(T)$, $c_p(T)$; niepewność katalogowa	Niewielka różnica w przewidywanej wymianie ciepła
Model turbulencji	k- ω SST (RANS) – uśrednianie, zakładana pełna turbulencja	Re w dolnym zakresie przejściowym, możliwe obszary laminarnych przepływów	CFD może przeszacowywać współczynniki przejmowania ciepła
Układ hydrauliczny	Symetryczny, idealnie rozwinięty profil przepływu	Zakręty, złącza, zmienna prędkość lokalna	Niejednorodny przepływ $\rightarrow$ mniejsza wymiana
Czynniki eksploatacyjne	Brak uwzględnienia zanieczyszczeń	Mikropęcherzyki powietrza, osad, niestabilność pomiarów	Dalsze obniżenie ΔT

Spójność wyników numerycznych i laboratoryjnych w tym przypadku jest wysoka, co potwierdza wiarygodność modelu CFD i skuteczność koncepcji HRS. Symulacje przewidywały obniżenie temperatury stojana silnika do poniżej 100 °C, a testy laboratoryjne to potwierdziły, wykazując redukcję temperatury ze 140 °C do 100 °C. Obniżenie temperatury o 40 °C jest kluczowe dla długowieczności i niezawodności silnika, co w oczywisty sposób przekłada się na wartość użytkową całego urządzenia.

Teoretycznie można podjąć próbę oszacowania łącznych oszczędności energii, jakie można uzyskać, wdrażając wszystkie trzy rozwiązania jednocześnie.

Koncepcja polega na tym, że dwa z systemów (wymiennik boczny/modułowy i HRS) odzyskują ciepło z różnych źródeł: odpadowej wody myjącej i strat cieplnych silnika.¹ Można wyobrazić sobie scenariusz, w którym gorąca woda z mycia (np. 55 °C) odpływa przez wymiennik boczny, podgrzewając zimną wodę zasilającą (15 °C) do 23 °C (na podstawie wyników laboratoryjnych). Jednocześnie, ciepło generowane przez silnik jest odzyskiwane i kierowane do tego samego strumienia wody. Połączenie obu rozwiązań może prowadzić do kumulacji zysków cieplnych, co pozwala na jeszcze większe podgrzanie wody przed włączeniem grzałki. To fundamentalna zmiana w zarządzaniu energią cieplną. Zamiast pasywnej dyssypacji, system staje się aktywnym układem rekuperacji. To odróżnia to rozwiązanie od tradycyjnych, które po prostu izolują lub rozpraszają ciepło.

Ilościowe pomiary sprawności (ε , η) oraz zmierzone oszczędności energetyczne potwierdzają tezę rozprawy — integracja innowacyjnych układów odzysku ciepła w urządzeniach AGD umożliwia zwiększenie ich sprawności i obniżenie zużycia energii elektrycznej.

Wymiennik przeciwprądowy na bocznej ścianie zmywarki daje natychmiastowy, bezpieczny efekt; integracja z HRS oraz opcjonalne dołączenie modułowego wymiennika dają rezerwę projektową, pozwalającą zachować klasę energetyczną nawet przy stratach montażowych ($\eta < 1$).

Rozbieżności ε_{sim} vs ε_{lab} szczególnie dla modułowego wymiennika wymagają korekty modelu CFD — należy uwzględnić straty do obudowy, bardziej realistyczne warunki brzegowe i opory hydrauliczne.

Należy mierzyć strumień masowy i czas trwania fazy (by przeliczyć Q [W] $\leftrightarrow$ Wh/cykl), raportować niepewności (średnia $\pm$ 95% CI), przeprowadzać co najmniej $n \approx 6$ –10 powtórzeń dla istotnych wariantów w celu testów statystycznych.

Aby uzyskać stabilne przesunięcie klasy energetycznej w produkcji seryjnej, rekomenduje się: optymalizację integracji wymiennika (minimalizacja mieszania, izolacja), walidację prototypów długotrwałych (≥ 1000 cykli) oraz analizę CAPEX/TCO (koszt wdrożenia vs oszczędności).

Tabela 25 podsumowuje praktyczną wartość każdego z rozwiązań, uwzględniając wnioski z rozdziału 7.2 (Wyzwania i ograniczenia wdrożeniowe), które muszą zostać zinterpretowane.

Tabela 25. Podsumowanie wartości proponowanych rozwiązań.

Rozwiązanie	Szacunkowy uzysk energii	kWh/100 cykli	Ocena wdrożeńiowa	Główne wyzwania
Przeciwprądowy wymiennik na bocznej ścianie	46,44 Wh	4,644	Wysoka	Ograniczona przestrzeń wewnątrz zmywarki, osadzanie się kamienia.
Wymiennik (HRS) w silniku BLDC	25 W	3,78 ($t_{\text{active}} = 1,5\text{h}$)	Wysoka	Konieczność wdrożenia nowego standardu silnika, koszty materiałów.
Modułowy wymiennik ciepła	444,73 W (teoretyczny)	14,82 ($t_{\text{active}} = 20\text{ min}$)	Średnia	Duża rozbieżność między symulacjami a wynikami laboratoryjnymi (ΔT ok. 4K zamiast 10K), co wskazuje na straty ciepła i niedoskonałości modelu.

8.2. Kierunki dalszych badań i rekomendacje dla przemysłu AGD

W świetle uzyskanych wyników daleko wykraczających poza dotychczasowe standardy energetyczne urządzeń AGD, warto skierować uwagę na kilka kluczowych obszarów badawczych i praktycznych działań, które mogą stać się fundamentem kolejnych etapów rozwoju technologii odzysku ciepła. Realizacja tych kierunków badawczych i strategicznych rekomendacji nie tylko zwiększy konkurencyjność producentów AGD, lecz również przyczyni się do zmniejszenia zużycia energii na skalę makroekonomiczną, co w dłuższej perspektywie będzie miało istotny wpływ na redukcję emisji gazów cieplarnianych i osiągnięcie celów klimatycznych.

Głęboka optymalizacja geometrii wymienników powinna objąć nie tylko analizę pojedynczych kanałów przepływowych, ale także ich układy seryjne i równoległe w różnych skalach wielkościowych. Badania numeryczne, wykorzystujące zaawansowane metody adaptacyjnego siatkowania oraz uwzględniające zjawiska turbulentne i nieliniowe efekty przyścienne, mogą odsłonić nowe warianty konstrukcyjne o jeszcze wyższym współczynniku przejmowania ciepła, przy jednoczesnym minimalizowaniu oporów hydraulicznych. Istnieje rozbieżność między wynikami symulacji a testów laboratoryjnych, zwłaszcza w przypadku wymiennika modułowego (10 K vs 4,25 K). Zaktualizowanie i doprecyzowanie warunków brzegowych w modelach CFD, wprowadzając straty konwekcyjne do otoczenia, jest kluczowe. Należy także przeprowadzić symulacje niestacjonarne, aby lepiej odwzorować dynamiczne procesy nagrzewania i chłodzenia. To pozwoli na stworzenie dokładniejszych modeli prognostycznych, które będą miały wyższą wartość inżynierską.

Jednym z kluczowych wyzwań jest eksplorowanie innowacyjnych materiałów konstrukcyjnych. Nanokompozyty, hybrydowe laminaty metalowo-ceramiczne czy stopy z domieszkami metali ziem rzadkich oferują potencjał zwiększenia przewodności cieplnej i oporności na korozję chemiczną. Długoterminowe testy eksploatacyjne, prowadzone w warunkach wysokich stężeń detergentów i przy zmiennych cyklach temperatur, pozwolą na zweryfikowanie trwałości takich rozwiązań oraz określenie optymalnych parametrów powłok ochronnych. Testy zanurzeniowe (168 h) są dobrym początkiem, ale nie odzwierciedlają w pełni cyklicznego obciążenia mechanicznego i termicznego. Należy przeprowadzić testy w warunkach „cyklu życia”, symulujące tysiące cykli mycia w różnych programach, aby ocenić długoterminową odporność na korozję, osadzanie się kamienia i zużycie mechaniczne. Kwestia materiałowa jest największym wyzwaniem dla masowej

komercjalizacji. Stopy aluminium, choć obiecujące pod względem przewodności cieplnej, są nieodporne na detergenty. Idealny SSiC jest niepraktyczny w produkcji cienkich rurek. Wskazuje się na konieczność dalszych badań nad powłokami ochronnymi, które mogłyby zabezpieczyć tanie, lekkie i dobrze przewodzące ciepło stopy aluminium. Alternatywnie, rekomenduje się rozwój technologii wytwarzania ceramiki o cieńszych ściankach, np. przez druk 3D lub inne zaawansowane metody. Celem jest znalezienie materiału, który połączy w sobie wysoką przewodność cieplną aluminium z wytrzymałością stali nierdzewnej, a wszystko to w opłacalnej cenie.

Pod kątem praktycznym, rozwój technologii modularyzacji wymienników otwiera drogę do ich adaptacji w różnych typach urządzeń – od pralek i suszarek, przez lodówki, aż po małe urządzenia kuchenne. Koncepcja modułowego wymiennika ciepła jest rewolucyjna, ponieważ odchodzi od projektowania komponentów przeznaczonych dla jednego modelu. To otwiera drogę do standaryzacji procesów produkcyjnych i serwisowych. Producenci powinni skupić się na opracowaniu znormalizowanych modułów o zoptymalizowanych parametrach, które mogą być łatwo adaptowane do różnych modeli zmywarek, a także do innych urządzeń (np. pralek, suszarek). Należy przeprowadzić dalsze badania nad wariantami takimi jak „Twister” i rurka d25mm, które w testach wykazały najwyższą efektywność. Przeprowadzenie testów poligonowych, w rzeczywistych warunkach domowych i przemysłowych, umożliwi zebranie danych o rzeczywistych trybach pracy, przeciążeniach cyklicznych i wpływie konserwacji na efektywność termiczną. Istotnym uzupełnieniem takich badań będzie opracowanie systemów łatwego demontażu i samooczyszczenia wymienników – wprowadzonych na przykład przy pomocy pulsacyjnych cykli płukania lub automatycznych przewietrzników, które utrzymają kanały przepływowe w czystości i zminimalizują ryzyko osadzania się kamienia i zanieczyszczeń.

Jednym z kluczowych wyzwań przed wdrożeniem na szeroką skalę jest pełna analiza ekonomiczna systemu – od fazy produkcji poprzez cały cykl eksploatacji aż po utylizację. Tylko poprzez szczegółowe zestawienie nakładów inwestycyjnych, kosztów serwisu, oszczędności wynikających z niższego zużycia energii i wpływu na środowisko, producenci będą mogli ocenić opłacalność wdrożenia technologii odzysku ciepła (HRS) w kolejnych segmentach AGD. W tym kontekście warto opracować zintegrowane modele symulacyjne, które połączą dane techniczne z analizami LCA i LCC. Są to uzupełniające się metodyki, które pozwalają spojrzeć na produkt – w tym przypadku wymienniki ciepła – nie tylko przez pryzmat parametrów technicznych, ale także z perspektywy

środowiskowej i ekonomicznej w całym okresie jego „życia”. Z perspektywy konsumenta i producenta kluczowe są nie tylko oszczędności energii, ale także opłacalność w długim okresie. Wyższe początkowe koszty związane z nowymi technologiami mogą być zrównoważone przez niższe rachunki za energię i dłuższą żywotność urządzenia. Zaleca się przeprowadzenie pełnej analizy LCC dla każdego z proponowanych rozwiązań, co pozwoli uzasadnić ich cenę rynkową. Równolegle, analiza LCA wskaże na realne korzyści środowiskowe, takie jak redukcja emisji CO₂ i zużycia wody, co może być wykorzystane w marketingu.

Obecna praca koncentrowała się na poszczególnych komponentach, jednak pełny potencjał leży w ich integracji. Należy zaproponować dalsze badania nad zintegrowanymi systemami, które łączą rekuperację ciepła z wody odpadowej z chłodzeniem silnika, być może w połączeniu z pompami ciepła. Wdrożenie systemu HRS dla silników BLDC jest rozwiązaniem o udowodnionej skuteczności zarówno w symulacjach, jak i w testach laboratoryjnych. Oprócz oszczędności energii, wydłuża on żywotność silnika, co stanowi dodatkową wartość dla konsumenta w kontekście rosnącego „prawa do naprawy”. Dodatkowo, analiza możliwości połączenia tych rozwiązań z odnawialnymi źródłami energii (np. energią słoneczną) może otworzyć drogę do urządzeń AGD o zerowym bilansie energetycznym.

Wreszcie, dla zapewnienia płynnego przejścia od prototypu do produktu masowego, należy zacieśnić współpracę z jednostkami normalizacyjnymi i instytutami badawczymi. Opracowanie branżowych standardów oraz procedur certyfikacyjnych dla urządzeń AGD z odzyskiem ciepła przyczyni się do zwiększenia zaufania konsumentów i ułatwi wdrożenia technologii na rynkach europejskich i globalnych. Szczególny nacisk warto położyć na wytyczne dotyczące efektywności energetycznej w warunkach sezonowych oraz metod pomiaru i raportowania oszczędności, co może zostać włączone do regulacji unijnych dotyczących ekoprojektu.

Bibliografia

- [1] IPCC: "Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change" [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 pp, (2023). DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
- [2] Boehm, S. i Schumer, C. "Top Findings from the IPCC Climate Change Report 2023", World Resources Institute. [Online] www.wri.org/insights/2023-ipcc-ar6-synthesis-report-climate-change-findings [Dostęp: 03.08.2025].
- [3] Global Facility for Disaster Reduction and Recovery. "IPCC Report Hits Home: How Our Work on Sustainable Development is Helping Countries Tackle the Climate Crisis", World Bank Blogs. [Online] www.blogs.worldbank.org/en/climate-change/ipcc-report-hits-home-how-our-work-sustainable-development-helping-countries-tackle [Dostęp: 03.08.2025].
- [4] IEA. "Energy Efficiency." [Online] www.iea.org/energy-system/energy-efficiency-and-demand/energy-efficiency [Dostęp: 03.08.2025].
- [5] Eurostat. "European Union's share of renewables continues to grow", Eurostat. [Online] www.ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20240605-2 [Dostęp: 03.08.2025].
- [6] Eurostat. "Energy consumption in households", Eurostat Statistics Explained. [Online] www.ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_consumption_in_households [Dostęp: 03.08.2025].
- [7] Główny Urząd Statystyczny. "Zużycie energii w gospodarstwach domowych w 2021 roku" (2022) GUS. [Online] www.stat.gov.pl/obszary-tematyczne/srodowisko-energia/energia/zuzycie-energii-w-gospodarstwach-domowych-w-2021-roku,12,2.html [Dostęp: 03.08.2025].
- [8] Qiao, L., Liu, J., Shao, J., Cheng, J., Bai, Y. i Bai, X. "The Impact of User Behavior Based on Energy-Saving Potential of Refrigerators: A Combined Survey and Experimental Analysis with Reference to China", Sustainability, vol. 17, nr 814, (2025). DOI: 10.3390/su17030814.
- [9] Bansal, P., Vineyard, E. i Abdelaziz, O. "Advances in household appliances- A review", INIS – International Nuclear Information System. [Online] www.inis.iaea.org/records/g0347-gax27 [Dostęp: 03.08.2025].

- [10] Advanced Thermal Solutions. "Why Temperature is Critical in Thermal Management." [Online] www.qats.com/cms/2011/05/18/why-temperature-is-critical-in-thermal-management [Dostęp: 03.08.2025].
- [11] Lozano III, A. "Thermal Analysis Methodology Best Practices", Lectrix®. [Online] www.electronics-cooling.com/2024/09/thermal-analysis-methodology-best-practices [Dostęp: 03.08.2025].
- [12] Sysmetric-TFS. "The Critical Role of Thermal Validation Equipment in Ensuring Electronics Reliability." [Online] www.sysmetric-tfs.com/the-critical-role-of-thermal-validation-equipment-in-ensuring-electronics-reliability [Dostęp: 03.08.2025].
- [13] ASHRAE TC 8.9. "Household refrigerators and freezers", ASHRAE, Inc. [Online] www.fa.remecco.com/wp-content/uploads/2024/12/SI_R14_Ch17.pdf [Dostęp: 03.08.2025].
- [14] European Commission. "Household Washing Machines", European Commission. [Online] www.energy-efficient-products.ec.europa.eu/product-list/household-washing-machines_en [Dostęp: 03.08.2025].
- [15] European Commission. "Household Dishwashers." [Online] www.energy-efficient-products.ec.europa.eu/product-list/household-dishwashers_en [Dostęp: 03.08.2025].
- [16] NYSERDA. "Heat Pump Clothes Dryer Buyers Guide." [Online] www.nys-erda.ny.gov/Featured-Stories/Heat-Pump-Clothes-Dryer-Buyers-Guide [Dostęp: 03.08.2025].
- [17] Department of Energy. "DOE Finalizes Cost-Saving Efficiency Standards for New Cooking Products, Based on Recommendations from Manufacturers and Consumer Advocates." [Online] www.energy.gov/articles/doe-finalizes-cost-saving-efficiency-standards-new-cooking-products-based-recommendations [Dostęp: 03.08.2025].
- [18] Gibbons Group. "Electric Motors in Household Appliances." [Online] www.gibbonsgroup.co.uk/media/blog/electric-motors-in-household-appliances/ [Dostęp: 03.08.2025].
- [19] European Commission. "In focus: Energy efficient appliances." [Online] www.energy.ec.europa.eu/news/focus-energy-efficient-appliances-2025-02-17_en [Dostęp: 03.08.2025].

- [20] Parlament Europejski i Rada. "Dyrektywa 2009/125/WE ustanawiająca ramy dla wytycznych dotyczących ekoprojektu dla produktów związanych z energią." [Online] www.eur-lex.europa.eu [Dostęp: 03.08.2025].
- [21] Komisja Europejska. "Rozporządzenie (UE) 2019/2022 ustanawiające szczególne przepisy dotyczące wymagań ekoprojektu w odniesieniu do zmywarek do naczyń." [Online] www.eur-lex.europa.eu [Dostęp: 03.08.2025].
- [22] Parlament Europejski i Rada. "Rozporządzenie (UE) 2017/1369 w sprawie etykietowania energetycznego." [Online] www.eur-lex.europa.eu [Dostęp: 03.08.2025].
- [23] Komisja Europejska. "Rozporządzenie delegowane (UE) 2019/2017 zmieniające rozporządzenie (UE) 2017/1369 w odniesieniu do etykietowania energetycznego urządzeń AGD." [Online] www.eur-lex.europa.eu [Dostęp: 03.08.2025].
- [24] European Commission. Energy Efficient Products. [Online] www.energy-efficient-products.ec.europa.eu/ecodesign-and-energy-label/understanding-energy-label_en [Dostęp: 03.08.2025].
- [25] Guetlein, M. C., Schleich, J., Faure, C. i Tu, G. "Energy literacy, income, and choice of energy-efficient appliances: a discrete choice experiment and welfare analysis in eight European countries", *Applied Economics*, vol. 1, s. 1–15, (2025). DOI: 10.1080/00036846.2025.2477317.
- [26] Bosch. "Zmywarka SMV25AX06E." [Online] www.bosch-home.pl/pl/mkt-product/SMV25AX06E [Dostęp: 03.08.2025].
- [27] BSH CDN Service. "Dishwashing Solutions", Bosch. [Online] www.media3.bosch-home.com/Documents/MCDOC03127876_BOS-Dishwasher-Brochure-Lores-20190415.pdf [Dostęp: 03.08.2025].
- [28] ENERGY STAR. "ENERGY STAR Certified Residential Dishwashers | Bosch - SHP78CM." [Online] www.energystar.gov/productfinder/product/certified-residential-dishwashers/details/2408137 [Dostęp: 03.08.2025].
- [29] Miele. "Hot water connection." [Online] www.mieleusa.com/e/hot-water-connection-zpv000000000000000020000143400-f [Dostęp: 03.08.2025].
- [30] Miele. "Miele's SolarSave protects the environment and goes easy on domestic finances." [Online] www.miele.de/en/m/miele-s-solarsave-protects-the-environment-and-goes-easy-on-domestic-finances-1021.htm [Dostęp: 03.08.2025].

- [31] ENERGY STAR. "ENERGY STAR Certified Residential Dishwashers | Miele - G 7156 SCVi." [Online] www.energystar.gov/productfinder/product/certified-residential-dishwashers/details/2508368 [Dostęp: 03.08.2025].
- [32] Winterhalter. "Zmywarki kapturowe | Seria PT." [Online] www.winterhalter.com/pl-pl/produkty/zmywarki-kapturowe/seria-pt [Dostęp: 03.08.2025].
- [33] Industrial Warewashers. "Winterhalter PT-L EnergyPlus Pass Through Dishwasher with Heat." [Online]. www.industrial-warewashers.com/winterhalter-pt-l-energyplus-pass-through-dishwasher-with-heat-recovery.html [Dostęp: 03.08.2025].
- [34] Hobart. "High level of economy - Dishwasher." [Online] www.hobart-export.com/products/warewashing/features/dishwashers/high-level-of-economy-dishwasher [Dostęp: 03.08.2025].
- [35] Hobart. "profi fx series." [Online] www.hobartuk.com/products/warewashing/undercounter-hood-type-dishwashers/undercounter-dishwashers/product/fx-series [Dostęp: 03.08.2025].
- [36] Bosch. "Series 8 heat pump dryers." [Online] www.bosch-home.in.th/en/specials/series-8-heat-pump-dryers [Dostęp: 03.08.2025].
- [37] Bosch. "6 Reasons Why You Need A Bosch Heat Pump Dryer In Your Life." [Online] www.bosch-home.in.th/en/experience-bosch/living-with-bosch/fresh-reads/6-reasons-why-you-need-a-bosch-heat-pump-dryer-in-your-life [Dostęp: 03.08.2025].
- [38] Siemens. "Siemens WQ46B2C9GB 9kg IQ-700 Heat Pump Condenser Tumble Dryer." [Online] www.siemens-home.bsh-group.com/uk/en/mkt-product/laundry-care/tumble-dryers/heat-pump-tumble-dryers/WQ46B2C9GB [Dostęp: 03.08.2025].
- [39] Samsung. "What are the advantages of having a digital inverter compressor in my refrigerator." [Online] www.samsung.com/au/support/home-appliances/what-are-the-advantages-of-having-a-digital-inverter-compressor [Dostęp: 03.08.2025].
- [40] Samsung. "Bespoke BMfreezer with SmartThings AI Energy Mode." [Online] www.samsung.com/pl/refrigerators/bottom-mount-freezer/bespoke-bmfreezer-with-smartthings-ai-energy-mode-387l-clean-black-rb38c7b6a22-ef [Dostęp: 03.08.2025].

- [41] Liebherr. "Energy efficiency fridge, freezer and fridge-freezer." [Online] www.liebherr.com/en-gb/fridges-freezers/corporate-responsibility/use/energy-efficiency-7760364 [Dostęp: 03.08.2025].
- [42] Qiao, L., Bai, X., Liang, X., Cheng, J. i Xia, Y. "User behavior and energy-saving potential of electric washing machines", *Energy Informatics*, vol. 7, (2024). DOI: 10.1186/s42162-024-00444-x.
- [43] Gluesenkamp, K., Patel, V. i Momen, A. "Efficiency limits of evaporative fabric drying methods", *Drying Technology*, vol. 39, s. 1-21, (2020). DOI: 10.1080/07373937.2020.1839486.
- [44] Qifei, J. i Luo, L. "The improvement on efficiency and drying performance of a domestic venting tumble clothes dryer by using a heat pipe heat recovery heat exchanger", *Applied Thermal Engineering*, vol. 136, (2018). DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.03.029.
- [45] Ha, J.-S. i Shim, J.-S. "A Numerical Analysis of the Reverse Heat Loss Method for a Refrigerator", *Journal of Energy Engineering*, vol. 20, s. 303-308, (2011). DOI: 10.5855/ENERGY.2011.20.4.303.
- [46] Ghassemi, Majid & Shapiro, Howard & Air and Energy Engineering Research Laboratory. "Review of energy efficiency of refrigerator/freezer gaskets [microform]: project summary / Majid Ghassemi and Howard Shapiro." Research Triangle Park, NC: U.S. Environmental Protection Agency, Air and Energy Engineering Research Laboratory (1991) [Online] www.nla.gov.au/nla.cat-vn4103725 [Dostęp: 03.08.2025].
- [47] Bengtsson, P., Berghel, J. i Renström, R. "A household dishwasher heated by a heat pump system using an energy storage unit with water as the heat source", *International Journal of Refrigeration-Revue Internationale Du Froid*, vol. 49, s. 19-27, (2015). DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2014.12.022.
- [48] Sawadogo, G., Igo, S., Compaore, A., Ouedraogo, D., Chesneau, X. and Zeghamati, B. "Experimental and Numerical Study of Energy Losses in a Barbecue Oven in Burkina Faso." *Open Journal of Energy Efficiency*, 9, 31-52, (2020). DOI: 10.4236/ojee.2020.91003.
- [49] NYSERDA. "Heat Pump Clothes Dryer Buyers Guide." [Online] www.nyserda.ny.gov/Featured-Stories/Heat-Pump-Clothes-Dryer-Buyers-Guide [Dostęp: 03.08.2025].

- [50] Konovalov, D., Tolstorebrov, I., Eikevik, T.M., Kobalava, H., Radchenko, M., Hafner, A. i Radchenko, A. "Recent Developments in Cooling Systems and Cooling Management for Electric Motors", *Energies*, vol. 16, nr 7006, (2023). DOI: 10.3390/en16197006.
- [51] Unia Europejska. "Regulation (EU) 2024/1781", EUR-Lex. [Online] www.eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1781/oj/eng [Dostęp: 03.08.2025].
- [52] Shah, R. K. i Sekulic, D. P. *Fundamentals of Heat Exchanger Design*. Wiley. (2003).
- [53] Safril, Mustofa, Zen M., Sumasto F. i Wirandi M. "Design of Cooling System on Brushless DC Motor to Improve Heat Transfers Efficiency", *Transdisciplinary Research and Education Center for Green Technologies*, vol. 9, nr 2, s. 584-593, (2022). DOI: 10.5109/4794206
- [54] ENERGY STAR. "Dishwashers." [Online] www.energystar.gov/products/dishwashers [Dostęp: 03.08.2025].
- [55] Ambarita, Himsar & Nasution, D & Gunawan, Safri & Nasution, A. Performance and Characteristics of Heat Pump Clothes Drier. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. (2017) DOI: 180.012027.10.1088/1757-899X/180/1/012027.
- [56] Richter, C. "Usage of dishwashers: Observation of consumer habits in the domestic environment." *International Journal of Consumer Studies*. 35. 180 – 186. (2011). DOI: 10.1111/j.1470-6431.2010.00973.x.
- [57] Tewes, T. J., Harcq, L., & Bockmühl, D. P. "Use of automatic dishwashers and their programs in Europe with a special focus on energy consumption." *Clean Technologies*, (2023) 5(3), 1067–1079. www.DOI.org/10.3390/cleantech-nol5030054
- [58] Zużycie energii w gospodarstwach domowych w 2018. Główny Urząd Statystyczny (2019).
- [59] Selimli, S., & Abajja, K. "Recovery of greywater thermal energy with a wire on a tube heat exchanger attached to a dishwasher." *Water Environment Research*, 93, (2021). www.DOI.org/10.1002/wer.1518
- [60] Patent numer: US20170290489A1: "Dishwasher with condensing drying system".
- [61] Patel, V., Savsani, V., & Tawhid, M. A. Thermal design and optimization of heat exchangers. In *Thermal Design and Optimization of Heat Exchangers* (pp. 33–98). Springer. (2019). DOI: 10.1007/978-3-030-10477-1_3

- [62] EUR-Lex. "Household appliances: energy consumption labelling (until 2011) | EUR-Lex." [Online] www.eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=legis-sum:l32004 [Dostęp: 03.08.2025].
- [63] Hoak, David & Parker, Danny & Hermelink, Andreas. "How Energy Efficient are Modern Dishwashers?" Proceedings from the 2008 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, Vol. 1. Mordor Intelligence. (2024).
- [64] Mordor Intelligence. (2024). *Dishwasher market — global industry analysis* (report). [Online] <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/dishwasher-market> [Dostęp: 03.08.2025].
- [65] ENERGY STAR. "Dishwashers Key Product Criteria." [Online] www.energystar.gov/products/dishwashers/key_product_criteria [Dostęp: 03.08.2025].
- [66] GASTROTECH. "Zmywarki podblatowe Wilterhalter seria UC." [Online] www.gastrotech.pl/down.php?fid=12 [Dostęp: 03.08.2025].
- [67] Bosch. "How eco mode saves energy." [Online] www.bosch-home.in/experience-bosch/living-with-bosch/fresh-reads/how-eco-mode-saves-energy [Dostęp: 03.08.2025].
- [68] Bosch. "Fact of Fiction: 5 Dishwasher Myths Debunked | Heart of The Home." [Online]. www.bosch-home.com/us/experience-bosch/heart-of-the-home/innovations/dishwashers/crystaldry [Dostęp: 03.08.2025].
- [69] Nikulin, N. Y., Kushchev, L. A. i Feoktistov, A. Yu. "Determination of thermal parameters of a shell and tube heat exchanger with increased turbulization of the working fluid", vol. 945, nr 1, 012004, (2020). DOI: 10.1088/1757-899X/945/1/012004.
- [70] García-Castillo, J. L. i Picón-Núñez, M. "Physical Dimensions as a Design Objective in Heat Transfer Equipment: The Case of Plate and Fin Heat Exchangers", *Energies*, vol. 14, nr 8, 2318, (2021). DOI: 10.3390/EN14082318.
- [71] Ala, M., Şahin, M. i Kılıç, M. "Experimental Investigation of the Effect of Different Parameters on Plate and Frame Heat Exchanger Effectiveness", *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, s. 951-959, (2024). DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1606028.
- [72] Nemati, H., Moghimi Ardekani, M., Mahootchi, J. i Meyer, J. P. "Logarithmic mean temperature difference", *Elsevier BV*, s. 165-177, (2024). DOI: 10.1016/b978-0-443-13902-4.00015-9.

- [73] Gorenflo, D., Chandra, U., Kotthoff, S. i Luke, A. "Influence of thermophysical properties on pool boiling heat transfer of refrigerants", *International Journal of Refrigeration-Revue Internationale Du Froid*, vol. 27, nr 5, s. 492-502, (2004). DOI: 10.1016/J.IJREFRIG.2004.03.004.
- [74] Asim, U. *Heat Transfer Intensification Using Advanced Thermal Fluids*, 2008.
- [75] Xu, Y. "Fouling problem and prevention of plate heat exchanger", *AIP Conf. Proc.*, vol. 2154, nr 1, 020067, (2019). DOI: 10.1063/1.5125395.
- [76] Hussein, H. A. Mohammed, Zulkifli, R., Wan Mahmood, W. M. F. i Ajeel, R. K. "Structure parameters and designs and their impact on performance of different heat exchangers: A review", *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 154, 111842, (2022). DOI: 10.1016/J.RSER.2021.111842.
- [77] Bosch. "SMV4EVX09E Zmywarka do zabudowy w pełni zintegrowana." [Online] www.bosch-home.pl/pl/mkt-product/zmywanie/zmywarki-do-zabudowy/zintegrowane-zmywarki-o-szerokosci-60-cm/SMV4EVX09E [Dostęp: 03.08.2025].
- [78] Patent numer: US7887643B2: "Dishwasher with counter-convection air flow."
- [79] Patent numer: US20110048342A1: "Heat exchanger water heating system for commercial dishwasher."
- [80] Patent numer: EP3865042A1: "Heat recovery oven with dishwasher."
- [81] Patent numer: EP3639722A1: "Dishwashers having a heat exchanger."
- [82] Patent numer: EP3731720A1: "A heat pump dishwasher."
- [83] Patent numer: EP3639722A1: "Dishwasher with integrated barrier member."
- [84] Winterhalter. "Zmywarka z przenośnikiem taśmowym do Twojej kuchni gastronomicznej." [Online] www.winterhalter.com/pl-pl/produkty/wielozbiornikowa-zmywarka-z-transportemtasowym-mtf [Dostęp: 03.08.2025].
- [85] Zhang, H., Ba, M. L., Li, F. C., Li, X. i Guo, Q. "Material of High Temperature Heat Exchanger in Fuel Cell System", *Materials Science Forum*, vol. 950, s. 170–174, (2019). DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.950.170.
- [86] Enerquip Thermal Solutions. "Heat Exchanger Material Selection Based on Common Criteria." [Online] www.enerquip.com/heat-exchanger-material-selection [Dostęp: 03.08.2025].
- [87] Poudeu, P.F.P., D'Angelo, J., Downey, A.D., Short, J.L., Hogan, T.P. i Kanatzidis, M.G. "High Thermoelectric Figure of Merit and Nanostructuring in Bulk p-type

- Na_{1-x}PbmSbyTe_{m+2}", *Angew. Chem. Int. Ed.*, vol. 45, s. 3835-3839, (2006). DOI: 10.1002/anie.200600865.
- [88] Wang, T., Berrill, P., Zimmerman, J. B., Rao, N. D., Min, J. i Hertwich, E. G. "Improved Copper Circularity as a Result of Increased Material Efficiency in the U.S. Housing Stock", *Environmental Science & Technology*, vol. 56, nr 7, s. 4565–4577, (2022). DOI: 10.1021/acs.est.1c06474.
- [89] Zhang, A. i Li, Y. "Thermal Conductivity of Aluminum Alloys—A Review", *Materials*, vol. 16, nr 8, 2972, (2023). DOI: 10.3390/ma16082972.
- [90] Bogaard, R. H. "Thermal Conductivity of Selected Stainless Steels", Springer, Boston, MA, s. 175-185, (1985). DOI: 10.1007/978-1-4684-4916-7_20.
- [91] Muldiani, R. F., Hadiningrum, K. i Pratama, D. "Experiments for Determining the Thermal Conductivity of Brass and 304 Stainless Steel with Direct Temperature Measurement Techniques Using Lorenz Number as Validation", [w:] *Proceedings of the 2nd International Seminar of Science and Applied Technology (ISSAT 2021)*, Atlantis Press, s. 123–129, (2021). DOI: 10.2991/aer.k.211106.020.
- [92] AT-Machining. "Bronze vs. Brass vs. Copper: Exploring Their Differences." [Online] www.at-machining.com/bronze-vs-brass-vs-copper [Dostęp: 03.08.2025].
- [93] Yang, H. i Luo, S. "Titanium products for everyday life". Elsevier, s. 13-25, (2019). DOI: 10.1016/B978-0-12-815820-3.000.
- [94] Electrolux. "Service Manual Dishwasher." [Online] www.4mcculloch.co.uk/images/mediator/553/599373144.pdf [Dostęp: 03.08.2025].
- [95] Kudla, M., Tewes, T. J., Gibbin-Lameira, E., Harcq, L. i Bockmühl, D. P. "Hygiene Efficacy of Short Cycles in Domestic Dishwashers", *Microorganisms*, vol. 13, nr 7, 1542, (2025). DOI: 10.3390/microorganisms13071542.
- [96] Beko. "Objaśnienie programów zmywarki Beko." [Online] www.beko.com/pl-pl/Pomoc-techniczna/zmywarka-do-naczyn--eksploatacja--artykul/objasnienie-programow-zmywarki-Beko [Dostęp: 03.08.2025].
- [97] Contributors to Wikimedia projects. "Dishwasher detergent - Wikipedia." [Online]. [www://en.wikipedia.org/wiki/Dishwasher_detergent](https://en.wikipedia.org/wiki/Dishwasher_detergent) [Dostęp: 03.08.2025].
- [98] Patent numer: US4714562A: "Automatic dishwasher detergent composition."

- [99] Parlament Europejski i Rada. "Rozporządzenie (WE) NR 648/2004 z dnia 31 marca 2004 r. w sprawie detergentów." [Online] www.eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:02004R0648-20150601&from=PL [Dostęp: 03.08.2025].
- [100] KitchenAid. "How Long Do Dishwashers Take & Why?" [Online] www.kitchenaid.com/pinch-of-help/major-appliances/how-long-do-dishwashers-run.html [Dostęp: 03.08.2025].
- [101] Whirlpool. "How Long Do Dishwashers Run?" [Online] www.whirlpool.com/blog/kitchen/how-long-do-dishwashers-run.html [Dostęp: 03.08.2025].
- [102] SteelPro Group. "Thermal Conductivity of Stainless Steel Explained & Chart." [Online] www.steelprogroup.com/stainless-steel/properties/thermal-conductivity [Dostęp: 03.08.2025].
- [103] AZoM. "Properties: Stainless Steel - Grade 304 (UNS S30400)." [Online] www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=965 [Dostęp: 03.08.2025].
- [104] Johnstone, G. "Can Stainless Steel Go in the Dishwasher Without Damaging It?" Family Handyman. [Online] www.familyhandyman.com/article/can-stainless-steel-go-in-the-dishwasher [Dostęp: 03.08.2025].
- [105] Dastgerdi, A. A., Brenna, A., Ormellese, M., Pedferri, M., & Bolzoni, F. M. "Electrochemical methods for the determination of Pedferri's diagram of stainless steel in chloride containing environment." *Materials and Corrosion-Werkstoffe Und Korrosion*, 70(1), 9–18, (2019).
<https://doi.org/10.1002/MACO.201810386>
- [106] WayKen. "304 vs 316 Stainless Steel: Guide to Choosing the Right Grade." [Online] www.waykenrm.com/blogs/304-vs-316-stainless-steel [Dostęp: 03.08.2025].
- [107] Pure Suds. "Can stainless steel go in the dishwasher?" [Online] www.pure-suds.com.au/blogs/news/can-stainless-steel-go-in-the-dishwasher [Dostęp: 03.08.2025].
- [108] Iredale, A. "Tips to reduce rust on cutlery from your dishwasher", CHOICE. [Online] www.choice.com.au/home-and-living/kitchen/dishwashers/articles/stainless-steel-rusting [Dostęp: 03.08.2025].
- [109] Davis, J. R. "Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys", ASM International, 2001.

- [110] Zhang, A. i Li, Y. "Thermal Conductivity of Aluminum Alloys-A Review", *Materials (Basel)*, vol. 16, nr 8, 2972, (2023). DOI: 10.3390/ma16082972.
- [111] Darwin Microfluidics. "FEP (Fluorinated Ethylene Propylene) – Chemical Resistance Chart." [Online] www.blog.darwin-microfluidics.com/fep-fluorinated-ethylene-propylene-chemical-resistance-chart [Dostęp: 03.08.2025].
- [112] Keys & Clamps. "FEP Coating." [Online] www.keytechno.com/service/fep-coating [Dostęp: 03.08.2025].
- [113] Zhang, H., Ding, W. i Aidun, D. K. "Synthesis, Characterization and Mechanical Properties of Silicon Carbide Nanowires", s. 1421-1425, (2010). DOI: 10.1115/IMECE2010-37506.
- [114] Schunk Technical Ceramics. "Silicon Carbide." [Online] www.schunk-group.com/technical-ceramics/en/materials/silicon-carbide [Dostęp: 03.08.2025].
- [115] Yuan, Y., Yang, J., Tan, B., Tang, B., Li, E., & Zhang, S. "Preparation, characterization and properties of FEP modified PTFE/glass fiber composites for microwave circuit application." *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28(8), 6015–6021, (2017). DOI: 10.1007/S10854-016-6277-4
- [116] Ha, H.-Y., Lee, T.-H., Bae, J.-H. i Chun, D.W. "Molybdenum Effects on Pitting Corrosion Resistance of FeCrMnMoNC Austenitic Stainless Steels", *Metals*, vol. 8, 653, (2018). DOI: 10.3390/met8080653.
- [117] Grabke, H. J., Spiegel, M. i Zahs, A. "Role of alloying elements and carbides in the chlorine-induced corrosion of steels and alloys", *Materials Research-Ibero-American Journal of Materials*, vol. 7, nr 1, s. 89–95, (2004). DOI: 10.1590/S1516-14392004000100013.
- [118] ASTM. "G102 – 89(2015) - Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements." DOI: 10.1520/G0102-89R15.
- [119] ISO. "17475:2005 - Corrosion of metals and alloys — Electrochemical test methods — Guidelines for conducting potentiostatic and potentiodynamic polarization measurements." DOI: 10.3403/30058007.
- [120] Tianxu Z., Yaobo H., Shengwei Y. "Effect of grain size on the electrochemical behavior of pure magnesium anode. *Journal of Magnesium and Alloys*. Volume 5, Issue 4, s. 404-411, (2017). DOI: 10.1016/j.jma.2017.09.003.

- [121] Jaśniok, M., Jaśniok, T. "Metody diagnostyki zagrożenia korozyjnego zbrojenia w konstrukcjach żelbetowych. Zaawansowane badania elektrochemiczne (cz. IV)." *Przegląd Budowlany*. s. 36-43, (2007).
- [122] Trzaska, M. i Trzaska, Z. "Elektrochemiczna spektroskopia impedancyjna w inżynierii materiałowej." Wydanie I. Warszawa: Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej (Wyd. PW) (2010).
- [123] ASTM G48-11(2020) e1. Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys by Use of Ferric Chloride Solution. ASTM International, (2020). DOI: 10.1520/G0048-11R20E01
- [124] ISO 17864:2005. "Corrosion of metals and alloys — Determination of the critical pitting temperature under potentiostatic control." International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, (2005).
- [125] Lee, T.-G., Moon, J.-S., Yoo, H. i Lee, J.-H. "Thermal Reliability Analysis of BLDC Motor in a High-Speed Axial Fan by the Accelerated Life Test", *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, vol. 17, (2005). DOI: 10.1007/s00231-008-0375-7.
- [126] Mukhlisin, A. i Yuniarto, M. N. "Study numerical and experimental a cooling of axial brushless direct current (BLDC) motor for electric scooter", vol. 1983, 020035, (2018). DOI: 10.1063/1.5046231.
- [127] Ramji, M. R. i Ismail, N. "Thermal Management for Brushless DC (BLDC) Motor 120KW", *International Conference Computing Engineering and Design*, s. 1–4, (2022). DOI: 10.1109/icced56140.2022.10010519.
- [128] Hur, J.-H., Lee, T.-G., Moon, S.-A., Lee, S.-J., Yoo, H., Moon, S.-J. i Lee, J.-H. "Thermal reliability analysis of a BLDC motor in a high-speed axial fan by the accelerated-life test and numerical methods", *Heat and Mass Transfer*, vol. 44, nr 11, s. 1355–1369, (2008). DOI: 10.1007/S00231-008-0375-7.
- [129] Aguilar-Zamorate, I. S., Pakštys, M., Galluzzi, R., Ibarra, L. i Amati, N. "Comparison of four liquid-cooling strategies for in-wheel motors", s. 1-7, (2024). DOI: 10.1109/isem62699.2024.10786781.
- [130] Ansys Inc. "ANSYS Fluent User's Guide, Ansys Inc." Canonsburg, PA, USA, (2023). DOI: 10.3390/en17246406.
- [131] Menter, F.R. "Zonal Two Equation Kappa-Omega Turbulence Models for Aerodynamic Flows." *Proceedings of the AIAA Fluid Dynamics Conference*, Orlando, FL, USA, (1993). DOI: 10.2514/6.1993-2906.

- [132] Habibi Khorasani, S.M. "Hydraulic Simulation Model for Dishwasher", praca magisterska, KTH, School of Engineering Sciences, Stockholm, Sweeden, (2018). [Online].
www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:1381816&dswid=3220
 [Dostęp: 03.08.2025].
- [133] Tang, J.S. "Modelling Study of Dishwasher Hydraulic Filtration System", Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science, San Francisco, CA, USA, (2019).
- [134] Kobielski, M.J., Skarka, W., Mazur, M. i Kadzielawa, D. "Evaluation of Strong Cation Ion-Exchange Resin Cost Efficiency in Manufacturing Applications—A Case Study", *Polymers*, vol. 14, 2391, (2022). DOI: 10.3390/polym14122391.
- [135] Mateja, K., Skarka, W., Peciak, M. i Niestrój, R. "Energy Autonomy Simulation Model of Solar Powered UAV", *Energies*, vol. 16, 479, (2023).
 DOI: 10.3390/en16010479.
- [136] Peciak, M. i Skarka, W. "Assessment of the Potential of Electric Propulsion for General Aviation Using Model-Based System Engineering (MBSE) Methodology", *Aerospace*, vol. 9, nr 2, 74, (2022).
 DOI: 10.3390/aerospace9020074.
- [137] Skarka, W., Sobota, M., Antys, P. i Skarka, M. "Enhancing Energy Efficiency of a Dishwasher via Simulation Modeling", *Energies*, vol. 17, nr 13, 3076, (2024).
 DOI: 10.3390/en17133076.
- [138] Mazur, M.; Skarka, W.; Kobielski, M.; Kądziaława, D.; Kubica, R.; Haas, C.; Unterberger, H. "Heat Exchange Analysis of Brushless Direct Current Motors." *Energies*, 17, 6469. (2024). DOI: 10.3390/en17246469
- [139] International Electrotechnical Commission. IEC 60751: Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors (Edition 3.0). IEC. (2022)
- [140] Expondo. "Klasy energetyczne: co oznaczają? Typy AGD." [Online] www.expondo.pl/inspiracje/klasy-energetyczne-co-oznaczaja-typy-agd
 [Dostęp: 03.08.2025].
- [141] Tauron. "Klasy energetyczne sprzętów AGD i RTV." [Online] www.lepiej.tauron.pl/styl-zycia/klasy-energetyczne-sprzetow-agd
 [Dostęp: 03.08.2025].

- [142] Zmywarka Bosch Serie 6 PerfectDry Zeolith SPS6ZMI35E. Bosch. [Online] www.bosch-home.pl/pl/mkt-product/SPS6ZMI35E [Dostęp: 03.08.2025].
- [143] Zmywarka BOSCH SMV6ZCX13E PerfectDry. Bosch. [Online] www.bosch-home.pl/pl/mkt-product/zmywanie/zmywarki-do-zabudowy/zintegrowane-zmywarki-o-szerokosci-60-cm/SMV6ZCX13E [Dostęp: 03.08.2025].
- [144] Zmywarka MIELE G 5110 SCi Active ComfortClose, Technologia EcoPower. Miele. [Online] www.miele.pl/product/12173810/zmywarka-wolnostojaca-g-5110-sc-front-active-front-cleansteel [Dostęp: 03.08.2025].
- [145] Zmywarka do zabudowy EEA43211L AirDry 300. Electrolux. [Online] www.electrolux.pl/kitchen/dishwashing/dishwashers/45-cm-dishwasher/eea432111 [Dostęp: 03.08.2025].
- [146] Hauer, A. and Fischer, F. "Open Adsorption System for an Energy Efficient Dishwasher." *Chemie Ingenieur Technik*, 83: 61-66, (2011).
www.DOI.org/10.1002/cite.201000197
- [147] Rozporządzenie delegowane Komisji (UE) 2019/2017 z dnia 12 marca 2019 r. uzupełniające rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2017/1369 etykietowania energetycznego zmywarek do naczyń dla gospodarstw domowych oraz uchylające rozporządzenie delegowane Komisji (UE) nr 1059/2010, Dz. Urz. UE L 315 z 5.12.2019, s. 87–104.
- [148] Bosch Home. "New Energy Label for Home Appliances / Energy label (dishwashers). Bosch manufacturer guidance (energy label explanation)." [Online] www.bosch-home.com/mt/bosch-innovations/energy-label [Dostęp: 03.08.2025].
- [149] Ji, C., Zhang, P., Wang, X., Du, Y., Liu, L., Zhang, B., & Huan, C. "Study on heat storage and heat release performance of casing heat pipe heat exchanger coupled phase change backfill body", Eighth International Conference on Energy System, Electricity and Power (ESEP 2023) (2024). DOI: 10.1117/12.3024325
- [150] Materiał zmiennofazowy (PCM). Wikipedia. [Online] www.pl.wikipedia.org/wiki/Materia%C5%82_zmiennofazowy [Dostęp: 03.08.2025].
- [151] Palappan, R., Pasupathy, A. "Heating and cooling capacity of phase change material coupled with screen mesh wick heat pipe for thermal energy storage applications." *Thermal Science*. 237-237, (2018).
DOI: 10.2298/TSCI180207237P.

- [152] The Basics of Heat Pipes – Their History, Principle, and Varieties explained. DNP.
[Online] www.global.dnp.biz/column/detail/10162360_4117.html
[Dostęp: 03.08.2025].
- [153] Patent numer: US20030131623A1: "Heat pump using phase change materials".
- [154] VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC). "VDI Heat Atlas". 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, (2010). (Źródło wykorzystane jako podstawa teoretyczna do analizy zagadnień wymiany ciepła i doboru metod obliczeniowych).

Spis ilustracji

<i>Rysunek 1. Schemat hydrauliczny zmywarki [94].</i>	38
<i>Rysunek 2. Porównanie przewodności cieplnej zależnej od grubości materiału.</i>	47
<i>Rysunek 3. Zjawisko korozji elektrochemicznej</i>	51
<i>Rysunek 4. Ogniwo Daniella (ogniwo galwaniczne).</i>	52
<i>Rysunek 5. Przykładowe próbki materiałów (AL, 304ST, SSiC)</i>	54
<i>Rysunek 6. Stanowisko do badań immersyjnych próbek materiałowych w piecu.</i>	55
<i>Rysunek 7. Proponowany wymiennik ciepła w zmywarce – model 3D.</i>	61
<i>Rysunek 8. Model 3D proponowanego wymiennika ciepła - HRS</i>	65
<i>Rysunek 9. Uproszczony schemat wymiennika ciepła HRS.</i>	65
<i>Rysunek 10. Model 3D silnika BLDC z HRS.</i>	66
<i>Rysunek 11. Model 3D modułowego wymiennika ciepła.</i>	69
<i>Rysunek 12. Schemat metodyki badań.</i>	78
<i>Rysunek 13. Geometria układu zmywarki w środowisku obliczeniowym [137].</i>	85
<i>Rysunek 14. Przygotowany model HRS w środowisku obliczeniowym.</i>	88
<i>Rysunek 15. Półprzezroczysty model 3D modułowego wymiennika ciepła.</i>	89
<i>Rysunek 16. Stanowisko laboratoryjne do badań wymiany cieplnej.</i>	93
<i>Rysunek 17. Stanowisko do badań systemu HRS.</i>	94
<i>Rysunek 18. Rozkład temperatury w przekroju poprzecznym wymiennika ciepła.</i>	98
<i>Rysunek 19. Mapa temperatur w przekroju HRS.</i>	99
<i>Rysunek 20. Mapa wektorów kierunku przepływu oraz kontury pola prędkości w przekroju HRS.</i>	100
<i>Rysunek 21. Wyniki badań numerycznych w ANSYS Fluent.</i>	102
<i>Rysunek 22. Wyniki badań numerycznych w SolidWorks Flow Simulation.</i>	103
<i>Rysunek 23. Badanie wymiennika ciepła na bocznej ścianie.</i>	105
<i>Rysunek 24. Wyniki testu wymiennika ciepła na bocznej ścianie zmywarki.</i>	106
<i>Rysunek 25. Wyniki testu chłodzenia HRS w komorze grzewczej.</i>	108
<i>Rysunek 26. Modułowy wymiennik przygotowany do badań.</i>	109
<i>Rysunek 27. Zamontowany modułowy wymiennik ciepła w testerze badawczym.</i>	109
<i>Rysunek 28. Wyniki testu wymiany ciepła dla modułowego wymiennika.</i>	110
<i>Rysunek 29. Modułowy wymiennik ciepła "Mini".</i>	111
<i>Rysunek 30. Wykres wymiany ciepła dla "Mini".</i>	112
<i>Rysunek 31. Modułowy wymiennik ciepła „Twister”.</i>	112
<i>Rysunek 32. Wykres wymiany ciepła dla "Twister".</i>	112
<i>Rysunek 33. Modułowy wymiennik ciepła „Płaszczowy - szeroki” (model 3D oraz model rzeczywisty)</i>	113
<i>Rysunek 34. Wykres wymiany ciepła dla "Płaszczowy - szeroki".</i>	113
<i>Rysunek 35. Modułowy wymiennik ciepła „Płaszczowy - wąski”</i>	114
<i>Rysunek 36. Wykres wymiany ciepła dla "Płaszczowy - wąski".</i>	114
<i>Rysunek 37. Wskaźnik efektywności energetycznej vs odzysk energii (baseline = 0,59 kWh/cykl).</i>	124

Spis tabel

<i>Tabela 1. Zużycie energii w gospodarstwach domowych w UE według zastosowania (2022).....</i>	<i>6</i>
<i>Tabela 2. Standardowe technologie i wyzwania związane z efektywnością energetyczną w głównych grupach urządzeń gospodarstwa domowego.....</i>	<i>9</i>
<i>Tabela 3. Efektywność energetyczna różnych systemów wymiany ciepła w urządzeniach AGD</i>	<i>10</i>
<i>Tabela 4. Skwantyfikowane straty ciepła i potencjał oszczędności energii w urządzeniach gospodarstwa domowego (na podstawie badań).....</i>	<i>12</i>
<i>Tabela 5. Porównanie zużycia wody i energii: mycie ręczne vs. zmywarka [56].</i>	<i>23</i>
<i>Tabela 6. Przykładowe wartości zużycia energii i wody w zmywarkach domowych.</i>	<i>24</i>
<i>Tabela 7. Kluczowe parametry wpływające na efektywność wymienników ciepła [76].</i>	<i>29</i>
<i>Tabela 8. Porównanie właściwości materiałowych stosowanych w urządzeniach AGD</i>	<i>34</i>
<i>Tabela 9. Opis do Rysunku 1.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabela 10. Kluczowe właściwości materiałów.</i>	<i>46</i>
<i>Tabela 11. Podsumowanie wyników testów zanurzeniowych.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabela 12. Studium zbieżności siatki</i>	<i>80</i>
<i>Tabela 13. Parametry symulacji.</i>	<i>82</i>
<i>Tabela 14. Parametry prędkości w symulacji.</i>	<i>100</i>
<i>Tabela 15. Porównanie wyników badań numerycznych.</i>	<i>103</i>
<i>Tabela 16. Zależność grubości ścianki i średnicy rurki na uzysk cieplny.</i>	<i>110</i>
<i>Tabela 17. Podsumowanie badań laboratoryjnych różnych wariantów modułowych wymienników ciepła.</i>	<i>114</i>
<i>Tabela 18. Studium niepewności - pomiary temperatury i wpływ na Q.</i>	<i>117</i>
<i>Tabela 19. Wpływ działań poprawiających pomiar $u(Q)$ dla $Q = 25\text{ W}$.....</i>	<i>118</i>
<i>Tabela 20. Zestawienie porównawcze technologii komercyjnych oraz proponowane rozwiązania w rozprawie.</i>	<i>121</i>
<i>Tabela 21. Progi klas energetycznych dla zmywarek oparte na wskaźniku EEI [147].</i>	<i>122</i>
<i>Tabela 22. Weryfikacja hipotez.</i>	<i>130</i>
<i>Tabela 23. Wyniki porównawcze badań numerycznych i laboratoryjnych.</i>	<i>134</i>
<i>Tabela 24. Zestawienie najważniejszych różnic pomiędzy założeniami modelu CFD a warunkami laboratoryjnymi dla modułowego wymiennika ciepła.</i>	<i>135</i>
<i>Tabela 25. Podsumowanie wartości proponowanych rozwiązań.....</i>	<i>137</i>

Spis skrótów

- BLDC – Brushless DC – bezszczotkowy silnik prądu stałego
- CFD – Computational Fluid Dynamics – obliczeniowa mechanika płynów
- E_{corr} – Corrosion potential – potencjał korozji
- EEI – Energy Efficiency Index – wskaźnik efektywności energetycznej
- EIS – Electrochemical Impedance Spectroscopy – spektroskopia impedancyjna
- VoF – Volume of Fluid – model/metoda objętości płynu
- FEP – Fluorinated Ethylene Propylene – fluoroetylen-propylen
- FVM – Finite Volume Method – metoda objętości skończonych
- HEX – Heat Exchanger – wymiennik ciepła
- HRS – Heat Recovery System – system odzysku ciepła
- HRU – Heat Recovery Unit – jednostka odzysku ciepła
- J_{corr} – Corrosion current density – gęstość prądu korozji
- LES – Large Eddy Simulation – symulacja dużych wirów
- LMTD – Logarithmic Mean Temperature Difference – średnia logarytmiczna różnica temperatur
- LPR – Linear Polarization Resistance – oporność polaryzacji liniowej
- MES (FEM) – metoda elementów skończonych (Finite Element Method)
- NTU – Number of Transfer Units – liczba jednostek transferowych
- PCM – Phase Change Material – materiał zmiennofazowy
- PDR – Power Density Ratio – współczynnika gęstości mocy silnika
- RANS – Reynolds-Averaged Navier–Stokes – uśrednione równania *Naviera–Stokesa*
- SGS – Subgrid-Scale – model subsiatkowy
- SPEC – Standard Energy Consumption – standardowe zużycie energii
- SST – Shear Stress Transport – transport naprężeń stycznych