

Agnieszka Kujawska

**PROCESY WYMIANY CIEPŁA W TERMOSYFONIE  
WYKORZYSTUJĄCYM NANOCIECZE**  
**Heat transfer processes in thermosyphon employing nanofluid**

Promotor: **prof. dr hab. inż. Zbigniew Królicki**

Promotor pomocniczy: **dr hab. inż. Bartosz Zajączkowski, prof. uczelni**

**Streszczenie:**

Termosyfony i rurki ciepła są obecnie jednymi z najbardziej efektywnych urządzeń wymiany ciepła. Dekady badań wyczerpały możliwości ich przyszłego rozwoju bazując na tradycyjnych czynnikach i mieszaninach, a popularne ciecze, takie jak woda czy glikole osiągnęły swój limit operacyjny. Zastosowanie nanocieczy jest uważane za jedną z najbardziej obiecujących metod pozwalających na dalsze przezwyciężanie ograniczeń transportu ciepła i masy.

Nanociecze definiuje się jako zawiesiny nanocząstek o przynajmniej jednym wymiarze poniżej 100 nm. Pierwszym celem ich syntezy była poprawa przewodnictwa cieplnego cieczy bazowej poprzez dodanie nanocząstek. Od czasu wprowadzenia koncepcji nanocieczy w roku 1995 przez Choi i Eastmana, zainteresowanie nimi znacząco wzrosło. Ich atrakcyjność jest rezultatem dobrych właściwości cieplnych, dużym stosunkiem powierzchni właściwej do objętości, zmniejszonym ryzykiem erozji oraz potencjalnym zastosowaniem w intensywnie rozwijających się dziedzinach, m.in. w mikroelektronice i medycynie.

Najczęściej badaną właściwością nanocieczy w obszarze wymiany ciepła jest przewodność cieplna. Literatura wskazuje na wyjątkowo wysokie wartości tego parametru, jednak nie przekłada się to w sposób bezpośredni na wzrost wydajności urządzeń cieplnych. Pomimo rosnącej ilości badań naukowych, wpływ nanocząstek na właściwości fizykochemiczne czynników roboczych oraz na wydajność zmian fazowych nie został jednoznacznie określony. Brak danych literaturowych w tym zakresie wskazuje na potrzebę skupienia się na rzeczywistych urządzeniach wymiany ciepła obejmujących wiele procesów zachodzących w tym samym czasie.

Prezentowana rozprawa doktorska podsumowuje badania termosyfonu z nanocieczami i roztworem surfaktantu, skupiając się głównie na procesie wrzenia. Wybrany zestaw czynników roboczych pozwolił na eksperymentalne zbadanie wpływu różnych parametrów na pracę urządzenia i obejmuje:

- nanociecze z nanocząstkami bazującymi na węglu, w tym płatkach tlenu grafenu z dodatkiem lub bez siarczanu dodecyłu sodu (SDS), oraz tzw. nanohorns stabilizowanych SDS,
- dwie ciecze oparte na nanocząstkach złota stabilizowane polimerem PVP (poliwinylopirolidon) lub wodorotlenkiem potasu (KOH),
- nanociecz krzemionkową z wodorotlenkiem potasu (KOH),
- wodny roztwór siarczanu dodecyłu sodu (SDS),
- wodę destylowaną.

Przeegląd literatury przeprowadzony pod kątem wykorzystania nanocieczy w termosyfonach ujawnił brak prac omawiających tak zróżnicowane czynniki w porównywalnych ze sobą warunkach pracy. Wśród nanocieczy z cząstkami na bazie węgla, nie znaleziono badań nad tlenkiem grafenu ani nanohorns. Do momentu rozpoczęcia prac badawczych opisanych w tej pracy nie było wiadomo, jak zachowują się płatki tlenu grafenu podczas wrzenia oraz w jaki sposób oddziałują na powierzchnię grzejną. Nie zostały przeprowadzone badania nad wpływem surfaktantu - dodecylosiarczanu sodu (SDS) na proces wrzenia w termosyfonie. Konieczność uzupełnienia powyższych braków zdefiniowała zakres merytoryczny prezentowanej dysertacji.

Wrzenie w termosyfonie jest procesem złożonym i zależy od specyfiki ścianek urządzenia oraz właściwości fizykochemicznych wybranego czynnika roboczego. W celu lepszego zrozumienia otrzymanych wyników przeprowadzono charakteryzację wybranych nanocieczy. Szczególny nacisk

położono na płatki tlenku grafenu ze względu na jego potencjał naukowy przy jednoczesnym braku szczegółowych danych literaturowych dotyczących tego materiału. W szeregu badań eksperymentalnych określono wymiary, przewodność cieplną, lepkość, ciepło właściwe, oraz napięcie powierzchniowe nanocieczy, a także dynamiczny i statyczny kąt zwilżalności.

Analizę efektywności transportu ciepła w zależności od czynnika roboczego przeprowadzono przy użyciu miedzianego termosyfonu o długości 1800 mm oraz średnicy wewnętrznej 20 mm. Dla każdego z badanych czynników roboczych wykonano serie pomiarowe z dwoma temperaturami cieczy chłodzącej (15°C oraz 25°C) oraz temperaturami wody grzewczej w zakresie 25-85°C (co 5°C). Na podstawie otrzymanych wyników porównano charakterystyki pracy urządzenia, wykazując, że zastosowanie odpowiednio dobranej nanocieczy obniża oporność cieplną urządzenia w zakresie małych obciążeń cieplnych.

W pewnych warunkach pracy, termosyfon działa w reżimie wrzenia gejzerowego. Przegląd literatury wykazał brak prac dotyczących wpływu nanocieczy i roztworów surfaktantów na proces wrzenia gejzerowego. Dzięki przetwornikom ciśnienia o wysokiej dokładności i częstotliwości pomiarów umieszczonym wzdłuż badanego urządzenia możliwa była obserwacja sygnału w zależności od czasu. Do statystycznej analizy wyników zaproponowano metodologię redukcji danych zaimplementowaną w języku Python. Obliczone częstotliwości i amplitudy występowania zdarzeń gejzerowych pozwoliły m.in. dowieść istnienia nieznanego dotąd, inhibitującego wpływu surfaktantu na wrzenie gejzerowe. Występowanie gejzerów ma pomijalny wpływ na uśrednioną efektywność wymiany ciepła w termosyfonie, jednak na skutek gwałtownych wzrostów ciśnienia i wyrzutów nieodparowanej cieczy z dużą prędkością prowadzi do powstawania uderzeń hydraulicznych i naprężeń mechanicznych, zmniejszających żywotność urządzenia.

Po przeprowadzeniu wszystkich serii pomiarowych z badaną nanocieczą, analizowano stan wewnętrznej powierzchni termosyfonu za pomocą kamery endoskopowej. Wykorzystując analizę SEM świeżego materiału i aglomeratów powstałych w trakcie badań eksperymentalnych dowiedziono, że depozycja nanocząstek w górnej części sekcji parowacza zmienia charakterystyki procesu wrzenia.

Otrzymane wyniki wykazały możliwość wykorzystania nanocieczy i roztworu surfaktantu do regulacji parametrów pracy termosyfonu w badanym zakresie obciążeń cieplnych, co potwierdza tezę leżącą u podstaw prezentowanej dysertacji.

Wrocław, 5.06.2019  
Agnieszka Kujawska