

## RECENZJA

### pracy doktorskiej mgr inż. Mateusza Korpysia pt.: „Analiza wnikania ciepła w wybranych układach przy przepływie nanopływu CuO - woda”

Promotor: Dr hab. inż. Janusz Wójcik, prof. Politechniki Śląskiej

Promotor pomocniczy: Dr inż. Grzegorz Dzido

#### 1. Przedmiot i zakres pracy

Recenzowana praca jest poświęcona wymianie ciepła przebiegającej z udziałem nanopływu jako czynnika chłodzącego, w różnych typach wymienników, z wykorzystaniem do tego metod numerycznej dynamiki płynów CFD.

Została ona zredagowana w sześciu rozdziałach, a otwiera ją krótkie wprowadzenie, po którym sformułowany został ogólny cel pracy.

W pierwszym rozdziale pracy Doktorant omawia własności nanopłynów w oparciu o dane literaturowe. Podaje jak na podstawie stężenia nanocząstek, ich własności i cieczy bazowej można wyznaczyć gęstość, dynamiczny współczynnik lepkości, czy ciepło właściwe nanopływu. Szczególną uwagę poświęca współczynnikowi przewodzenia ciepła, analizując między innymi jaki wpływ może nań wywierać kształt cząstek, temperatura, pH cieczy oraz zjawiska i efekty występujące w tych płynach.

Drugi rozdział dotyczy numerycznej mechaniki płynów w modelowaniu transportu pędu i energii. Autor podaje tutaj równania różniczkowe opisujące w sformalizowany sposób zasady zachowania tych wielkości, omawia modele burzliwości najczęściej wykorzystywane w numerycznej mechanice płynów. Przedstawia także możliwe sposoby modelowania przepływów wielofazowych i towarzyszącej im wymiany ciepła w odniesieniu do nanopłynów.

W następnych trzech rozdziałach, stanowiących zasadniczą część rozprawy, prezentuje własne osiągnięcia dotyczące wnikania ciepła od nanopływu CuO-woda kolejno do ścianki: węzownicy, wymiennika z ożebrowaniem i wymiennika typu rura w rurze. Rozdziały te mają taki sam układ. Każdy otwiera wstęp, z analizą aktualnego stanu wiedzy w zakresie badanego przypadku, po którym następuje opis stanowiska badawczego oraz podstawowe informacje o modelowaniu numerycznym, wykorzystywanym programie, przyjętym modelu i zastosowanej siatce. W kolejnych podrozdziałach Doktorant przedstawia i analizuje wyniki otrzymane z modelowania, porównując je z uzyskanymi w badaniach eksperymentalnych oraz wynikającymi z równań literaturowych. Stwierdzenia i wnioski wynikające z przeprowadzonych symulacji składają się na krótkie zakończenie każdego z tych rozdziałów.

Ostatnia część pracy to podsumowanie całości, zawierające wnioski końcowe, po których następuje bibliografia, obejmująca 219 pozycji literatury, głównie specjalistycznej, w znacznej części opublikowanej w ostatnich latach.

Całość liczy 120 stron tekstu, w tym 57 rysunków w postaci: wykresów i schematów oraz kilka tabel zestawieniowych.

## 2. Ocena pracy i uwagi ogólne

Niewielki dodatek nanocząstek, zwykle metali lub ich tlenków do cieczy, powoduje zmianę jej własności, w tym wzrost współczynnika przewodzenia ciepła, sięgający nawet kilkunastu procent. To sprawia, że nanopłyny mogą stanowić interesującą alternatywę dla konwencjonalnych nośników ciepła. Wymaga to jednak bliższego poznania procesów cieplnych przebiegających z ich udziałem, a dotychczasowy stan wiedzy w tej dziedzinie nie jest wystarczający. Z opublikowanych prac wynika, że obecność nanocząstek skutkuje na ogół zwiększeniem współczynnika wnikania ciepła w stosunku do cieczy bazowej, ale skala tego wzrostu może być różna, zależnie od rodzaju i składu nanopłynów. W tym kontekście uważam, że z poznawczego punktu widzenia podjęcie tej problematyki było zasadne, a uzyskane wyniki mogą mieć znaczenie użytkowe.

Za cel Doktorant postawił sobie zbadanie wpływu obecności nanocząstek CuO w wodzie na proces wnikania ciepła do ścianek wymienników o różnej konfiguracji, z wykorzystaniem do tego modelowania numerycznego. Taki sposób postępowania jest coraz szerzej stosowany w badaniu różnych procesów, stanowiąc alternatywę dla tradycyjnego podejścia opartego o badania eksperymentalne. Pozwala uzyskać więcej informacji, w krótszym czasie, eliminując problemy związane ze skalą analizowanych procesów i urządzeń.

Symulacje numeryczne wykonał dla trzech różnych wymienników: w postaci wężownicy, wymiennika ożebrowanego i wymiennika typu rura w rurze. Dzięki temu zakresem pracy objął wymianę ciepła zachodzącą w różnych warunkach przepływu. W przestrzennej wężownicy, w której pod wpływem siły odśrodkowej wytwarza się dodatkowy przepływ wtórny, w prostym, ale pierścieniowym kanale wymiennika rura w rurze, czy oryginalnym wymienniku Zalman ZM-WB3 z rozwiniętą powierzchnią. Wybór tego ostatniego jest szczególnie godny podkreślenia, nie jest to, bowiem rozwiązanie przemysłowe, ale za to ze względu na swoją konstrukcję i gabaryty odpowiednie do chłodzenia procesorów.

Nanopłyn o różnych stężeniach CuO stanowił czynnik chłodzący. Przyjęcie, jako odniesienia cieczy bazowej, wymagało przeprowadzenia podobnych symulacji dla samej wody. W obliczeniach zmieniane były temperatura wlotowa cieczy oraz wydatek ich przepływu, w różnych zakresach, zależnie od wymiennika.

W ramach tej pracy Doktorant nie przeprowadzał eksperymentów, a poprawność symulacji numerycznych weryfikował wykorzystując wyniki wcześniejszych prac doświadczalnych, wykonanych na Wydziale Chemicznym Politechniki Śląskiej. To determinowało wybór zakresów zmian tych parametrów. Stężenia nanopłynów zawierały się w przedziale od 0,61% do maksymalnie 2,25% obj. Zakresy zmian wydatku przepływu pozwalały symulować przepływ laminarny w wężownicy i wymienniku z żebrami oraz burzliwy w wężownicy i kanale pierścieniowym. W tym ostatnim analizowane było wnikanie ciepła zarówno przy przepływie współprądowym, jak i przeciwprądowym. Dla sprawdzenia wpływu ukształtowania rury Autor wykonał obliczenia również dla prostego kanału o takiej samej średnicy i długości jak wężownica.



Doktorant w swojej pracy korzystał z metod numerycznej mechaniki płynów, przyjmując jednofazowy model przepływu. Jest to pewne uproszczenie, bo nanopłyn jako koloid jest układem dwufazowym, a w ślad za tym należałoby wybrać model wielofazowy. Dotychczasowe doświadczenia pokazują jednak, że obydwie podejścia są uprawnione, przy niewielkich stężeniach nanopływu dają, bowiem poprawne, bliskie sobie wyniki. Znajomość własności fizycznych nanopłynów i znacząco krótszy czas obliczeń uzasadniają dopuszczalność takiego uproszczenia.

Wykorzystał oprogramowanie CFD ANSYS Fluent w wersjach 13 i 14.5 wybierając metodę objętości skończonych, opartą o dyskretyzację równań drugiego rzędu oraz standardowy algorytm obliczeń, SIMPLE. W odniesieniu do przepływów burzliwych korzystał z modelu turbulencji *k-ε Realizable*. Modele z grupy *k-ε* należą do najpopularniejszych i są niewątpliwie najczęściej wybieranymi. Lista dostępnych modeli, zwłaszcza w wersji Fluent 14.5, jest jednak znacznie szersza i można było pokusić się o inny wybór, a jeszcze lepiej wybory różnych modeli, odpowiednio do rozpatrywanego przypadku, dających być może dokładniejsze wyniki symulacji. Ważną rolę w obliczeniach numerycznych, mogącą istotnie rzutować na rozwiązanie, odgrywa siatka numeryczna, a zwłaszcza jej gęstość. W pracy Doktorant testował siatki o różnej liczbie komórek elementarnych tylko w przypadku wnikania ciepła w węzownicy. Ostatecznie wybrał tę najmniej liczną, kierując się najkrótszym czasem obliczeń, przy podobnych wynikach symulacji. To zrozumiałe, ale być może równie dobre rezultaty dałyby siatki o jeszcze mniejszej gęstości. Dlatego lepiej jest zmniejszać liczbę ich komórek do poziomu, przy jakim dokładność obliczeń zaczyna spadać i na tej podstawie dokonywać ostatecznego wyboru.

Autor podaje typowe parametry oceny „jakości” siatek OQ i CES, ich wartości minimalne, średnie i maksymalne. Lepiej byłoby przedstawić ich rozkłady, a jako średnie podać wartości modalne.

Wyniki uzyskane z symulacji numerycznych Doktorant omówił w pracy i przedstawił na licznych wykresach, jako zależność liczby Nusselta od Reynoldsa. Dodatkowo w przypadku wymiennika przeznaczanego do chłodzenia procesora analizował ważną wielkość z punktu widzenia właściwego jego działania – temperaturę. Porównał ze sobą wyniki otrzymane dla nanopłynów i samej wody, a także wynikające z równań innych autorów, wziętych z literatury.

Zrealizował tym samym postawiony cel, otrzymując rezultaty, które uzupełniają, a nawet korygują dotychczasową wiedzę, co do celowości stosowania nanopłynów jako nośnika ciepła. Korzyści z nich okazały się być znikome i trudno je uznać za interesującą alternatywę dla wody. Współczynnik wnikania ciepła dla analizowanego nanopływu CuO-woda przyjmuje, bowiem podobne wartości jak dla wody, a w zastosowaniu do chłodzenia procesora pozwala obniżyć jego temperaturę maksymalnie tylko o około 0,5 K.

Biorąc pod uwagę całość pracy oceniam ją pozytywnie. Jest napisana jasno i zwięźle, a jej układ jest przejrzysty i nie budzi zastrzeżeń. Na podkreślenie zasługuje dobry styl i język rozprawy. Wyniki obliczeń zostały starannie przedstawione na licznych rysunkach, trafnie dobranych i właściwie ilustrujących omawiane zagadnienia.

Prezentacja wyników rodzi jednak pewien niedosyt. Analiza porównawcza niektórych z nich jest lakoniczna, sprowadza się do zwrócenia uwagi na występujące podobieństwa i różnice, bez próby tłumaczenia przyczyn czy komentarza Autora. Szkoda, bo wówczas praca zyskałaby jeszcze na wartości. Przykładowo, z symulacji wynika, że w warunkach przepływu burzliwego wnikanie ciepła w węzownicy jest mniej intensywne, niż w prostej rurze (strumień wymianianego ciepła jest o około 10% mniejszy). Zupełnie inaczej niż np. w pracy Elasyeda i wsp. [181], którą cytuje Doktorant, a która podaje, że współczynnik wnikania ciepła w



wężownicy jest o 60% większy niż w rurze. Z kolei przy przepływie laminarnym w wężownicy obecność cząstek w wodzie nie wpływa wymianę ciepła, w prostej rurze rośnie ona natomiast blisko dwukrotnie. Jak wynika z rys. 3.15 dla wody, jako czynnika chłodzącego liczba Nusselta w wężownicy przyjmuje wartości znacznie większe, nawet trzykrotnie, niż w rurze. W porównywanej pracy [181] wzrost ten jest nieporównywalnie mniejszy, bo tylko 10%. Czy tak duże różnice mogą wynikać tylko ze stosowania innego nanopłynów  $Al_2O_3$ -woda zawierającego więcej nanocząstek?

### 3. Uwagi szczegółowe

Dotyczą drobnych zastrzeżeń natury formalnej oraz porządkowej i w żaden sposób nie rzutują na ocenę całej pracy.

1. Poza stężeniem objętościowym nie podano w niej innych informacji o analizowanych nanopłynach. Nie wiadomo czy te stężenia stanowiły udział czy ułamek cząstek w wodzie. Jaki kształt i wymiary miały nanocząstki? Wiadomo tylko, że w badaniach wnikania ciepła w kanale pierścieniowym ciecz zawierała różne stabilizatory i cząstki 30–50  $\mu m$ .
2. Dlaczego obliczając współczynnik wnikania ciepła od nanopłynów do ścianki wężownicy brano pod uwagę zewnętrzną, a nie wewnętrzną jej powierzchnię – równ. (3.10)?
3. Nie wiadomo, na czym polegało „poprawianie wyników obliczeń stężeń nanopłynów... oraz pomiarów ich gęstości”, o czym wspomina Autor na str.62?
4. W rozdziałach 3 i 5 Autor posługuje się prędkościami nanopłynów, a w rozdziale 4 jego wydatkiem masowym. Podany zakres zmian tego wydatku to 0,0153÷0,044 kg/s, a rysunki 4.8÷4.10 dotyczą wydatku 0,05 kg/s.
5. Temperatury podane na str. 45 w K i  $^{\circ}C$  nie odpowiadają sobie; na rys.4.24 zaznaczono tylko 6 przebiegów, a w jego legendzie jest ich 9.

### 4. Wniosek końcowy

Oceniając pracę doktorską Pana mgr inż. Mateusza Korpysia pt.: „Analiza wnikania ciepła w wybranych układach przy przepływie nanopłynów CuO-woda” stwierdzam, że spełnia ona wymogi stawiane rozprawom doktorskim przez Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z 14 marca 2003 roku.

Zakreś tej pracy jest obszerny, a Doktorant wykazał się odpowiednią wiedzą dotyczącą nanopłynów oraz umiejętnością modelowania numerycznego procesów transportu pędu i ciepła, a w konsekwencji tego prowadzenia pracy naukowej. To, że nie udało się uzyskać spektakularnych rezultatów nie zależało od Doktoranta, który wykazał duże zaangażowanie w realizację rozprawy. Kwestie podniesione w uwagach nie mają wpływu na otrzymane wyniki.

Stawiam, zatem wniosek o przyjęcie tej pracy i dopuszczenie Pana mgr inż. Mateusza Korpysia do jej publicznej obrony.

*Kowierski*