



Gliwice, 17 grudnia 2016 r.

Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Mateusza KORPYSIA p.t.:**Analiza wnikania ciepła
w wybranych układach przy przepływie nanopływu CuO-woda**

Podstawą niniejszej recenzji jest pismo z dnia 15 września 2016 r. Dziekana Wydziału Chemicznego Politechniki Śląskiej w Gliwicach, P. Prof. dr hab. inż. Krzysztofa Walczaka, poprzedzone uchwałą Rady Wydziału w dniu 22 lipca 2013 r. Promotorem pracy jest dr hab. inż. Janusz Wójcik, Prof. w Pol. Śl.

I. ZAKRES ROZPRAWY I JEJ TEMATYKA

Pan mgr inż. Mateusz Kopyś przedmiotem zasadniczej części swej rozprawy doktorskiej uczynił modelowanie komputerowe procesów wnikania ciepła przebiegających z udziałem nanopływu CuO-woda. Do wyboru tej tematyki badań Autora skłoniło dość powszechne przekonanie, że nanopłyn, charakteryzując się wyższym współczynnikiem przewodzenia ciepła niż płyn bazowy, winien intensyfikować konwekcyjną wymianę ciepła. Tym samym zastosowanie nanopływu powinno pozwolić na zmniejszenie powierzchni wymiany ciepła i ograniczenie kosztów eksploatacyjnych urządzeń.

Podstawowe kwestie dotyczące pól temperatury w wybranych układach cieplnych oraz rozkładu liczb Nusselta, Doktorant rozstrzygnął posługując się komercyjnym oprogramowaniem inżynierskim ANSYS Fluent i budując stosowne modele komputerowe procesów ciepło-przepływowych. Istotą tych modeli są równania różniczkowe numerycznej mechaniki płynów (tzw. Computational Fluid Mechanics, CFD), obejmujące przede wszystkim równanie ciągłości, równania ruchu, równanie energii oraz model turbulencji. Równania te Doktorant uzupełnił informacjami na temat warunków brzegowych oraz informacjami o właściwościach cieplnych i transportowych nanopływu, tzn. danymi na temat gęstości ρ , ciepła właściwego c_p , współczynnika przewodzenia ciepła λ oraz współczynnika lepkości dynamicznej η . Na podkreślenie zasługuje fakt, że Doktorant wykorzystał każdorazowo wartości tych właściwości nanopływu zmierzonych w warunkach eksperymentów służących następnie do walidacji eksperymentalnych zbudowanych modeli komputerowych. W szczególności mgr inż. Kopyś

przeanalizował przepływ nanopłynu oraz towarzyszący mu konwekcyjny transport ciepła w trzech, ważnych technicznie, układach, a mianowicie: w węzownicy, w wymienniku ciepła służącym chłodzeniu procesora komputera osobistego oraz w kanale pierścieniowym wymiennika typu rura-w-rurze.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że recenzowana praca prezentuje właściwe podejście do problemu naukowego, łącząc w sobie budowę modelu matematycznego, przeprowadzenie symulacji komputerowych oraz obróbkę matematyczną zmierzonych wielkości łącznie z porównaniem uzyskanych wyników obliczeniowych z danymi eksperymentalnymi. Wartości poznawcze pracy oraz stopień jej złożoności sprawiają, że analizowany problem stanowi moim zdaniem poważne wyzwanie badawcze i może stanowić przedmiot pracy doktorskiej. Jednocześnie zaproponowany temat rozprawy trafnie oddaje jej treść.

2. STOSOWANY APARAT BADAWCZY

Jak już wspomniałem w poprzednim punkcie recenzji, istotą pracy doktorskiej Pana Korpyśa jest modelowanie komputerowe trzech wybranych układów cieplnych przez które przepływa nanopłyn CuO-woda. Przepływ nanopłynu Doktorant modelował traktując go jako ośrodek jednofazowy, którego właściwości zależą oczywiście od udziału objętościowego nanocząstek. Autor, stosując pakiet ANSYS Fluent, zbudował trójwymiarowe modele geometryczne, dokonał ich dyskretyzacji, ocenił jakość stosowanych komórek numerycznych i dopiero po upewnieniu się, że uzyskiwane rezultaty obliczeń są niezależne od liczby tych komórek, przeprowadził właściwe symulacje komputerowe. Sprzężenie pomiędzy polem prędkości oraz polem ciśnienia Pan Korpyś zrealizował za pomocą standardowego algorytmu SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*). Jeśli chodzi o model turbulencji to wykorzystał najpopularniejszy z modeli turbulencji, a mianowicie model *k-ε Realizable*. Zjawiska towarzyszące przepływowi w warstwie przyściennej Doktorant modelował za pomocą tzw. *enhancement wall treatment* (EWT). Wszystkie te działania składają się moim zdaniem na twórcze zastosowania numerycznych technik komputerowych, a w szczególności CFD (Computational Fluid Dynamics).

Doktorant nie przeprowadził osobiście żadnych eksperymentów – przynajmniej tak zrozumiałem stosowne fragmenty pracy – jednakże rezultaty uzyskane za pomocą każdego zbudowanego przez siebie modelu porównał z wynikami pomiarów otrzymanymi w trzech pracach dyplomowych magisterskich zrealizowanych w Katedrze Inżynierii Chemicznej i Projektowania Procesowego. Porównanie to na ogół upoważniało Autora do stwierdzenia, że opracowany model trafnie przewiduje rezultaty pomiarów temperatur w układzie, choć w jednym przypadku – w przypadku wymiennika ciepła służącego chłodzeniu procesora komputera osobistego – zgodność nie jest zadawalająca. Tym niemniej należy docenić wysiłki Doktoranta służące walidacji budowanych w ramach doktoratu modeli komputerowych.

Na pochwałę zasługuje także bardzo bogaty spis źródeł literaturowych do których Autor odniósł się w swej dysertacji. Spis ten liczy aż 219 pozycji, co jest liczbą imponującą jak chodzi o prace doktorskie. Co jeszcze ważniejsze, są to źródła właściwie dobrane o prawidłowo zebranych danych bibliograficznych. Czytelnik szczególnie będzie sobie cenił informację o doi (*digital object identifier*) prawie każdej cytowanej pozycji. Sposób cytowania tych źródeł, choć nie najczęściej stosowany w tekstach naukowych z obszaru nauk inżynierskich, absolutnie dopuszczalny i jednoznaczny. Jednocześnie pragnę zauważyć, że formalnie Autor dokonał

przeglądu literatury odnośnie każdego z trzech analizowanych układów cieplnych przez które przepływa nanopłyn CuO-woda. Te przeglądy literatury nie są jednak wyodrębnione z tekstu rozdziałów i opatrzone osobnym tytułem (co byłoby podejściem standardowym) i tym samym trochę giną obok innych informacji w danym rozdziale.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że Doktorant ma aktualną wiedzę w dziedzinie zjawisk będących przedmiotem rozprawy. Jest biegły w posługiwaniu się nowoczesnymi narzędziami obliczeniowymi i metodami komputerowymi. Stosowany przez Niego aparat badawczy jest generalnie właściwy, choć do samego opracowania uzyskanych wyników mam trochę zastrzeżeń. Zawarłem je głównie w punkcie 4 niniejszej recenzji.

3. WALORY NAUKOWE PRACY

W moim przekonaniu, praca doktorska mgr inż. Korpysia wnosi wartościowy, poznawczy wkład do analiz procesów ciepłno-przepływowych w układach z udziałem nanopłynu CuO-woda. Do najwartościowszych elementów naukowych rozprawy zaliczam:

1. Podjęcie badań nad ważnym, trudnym i nie w pełni rozpoznanym procesem konwekcyjnego transportu ciepła w układach z udziałem nanopłynu CuO-woda.
2. Opracowanie trzech modeli matematycznych analizowanych zjawisk w ważnych technicznie instalacjach oraz implementacja komputerowa tych modeli.
3. Częściowa walidacja zbudowanych modeli matematycznych analizowanych zjawisk.
4. Przeprowadzenie symulacji komputerowych, ilustrujących przebieg procesu konwekcyjnego transportu ciepła w układach z udziałem nanopłynu CuO-woda.

4. UWAGI O CHARAKTERZE KRYTYCZNYM I POLEMICZNYM

Przy wszystkich swoich zaletach, dysertacja mgr inż. Korpysia skłania także do uwag o charakterze krytycznym, czy polemicznym. Poniżej zestawiam ważniejsze zastrzeżenia oraz wątpliwości merytoryczne, jakie nasunęły mi się podczas lektury pracy:

1. W pracy nie doszukałem się ani wyraźnej listy przyjętych założeń upraszczających przyjętych podczas budowy poszczególnych trzech modeli matematycznych, ani klarownego wyjaśnienia dlaczego Doktorant zdecydował się stosować model jednofazowy do opisu przepływu nanopłynu.
2. W pracy nie doszukałem się precyzyjnego opisu warunków brzegowych przyjętych przy modelowaniu wszystkich trzech analizowanych przypadków. Moje wątpliwości budzi także przyjęcie stałej wartości prędkości przy dopływie do układu – np. str. 46. Niejasny jest też dla mnie tekst, np. na str. 45, podający na której ścianie zmierzono temperatury za pomocą termoelementów.
3. Odczuwam duży niedosyt informacji jeśli chodzi o określenie liczbowej wartości współczynnika wnikania ciepła α , a w dalszej kolejności, wartości liczby Nusselta Nu we wszystkich trzech eksperymentach. Autor nie podał ani szczegółów jak wyznaczona była wartość gęstości strumienia ciepła \dot{q} , ani wartość powierzchni wymiany ciepła F ani wreszcie jak określano różnicę temperatur ΔT będącą modułem napędowym procesu. Tym samym nie byłem w stanie sprawdzić w szczególności wartości liczb Nusselta zamieszczonych w pracy, ani odnieść się bliżej do porównań dokonanych przez

- Autora. Mam też wątpliwości czy zastosowanie średniej logarytmicznej różnicy temperatur jest w każdym przypadku właściwe. Przecież konieczność stosowania takiej średniej wynika z eksponencjalnego profilu temperatur obu czynników w wymienniku.
4. Stała wartość gęstości strumienia ciepła \dot{q} na styku procesora i wymiennika ciepła w przypadku II budzi wątpliwości. Być może to założenie jest przyczyną niezgodności temperatur obliczonych za pomocą modelu i zmierzonych, o czym Doktorant pisze na początku strony 66. Szkoda, że Autor nie drążył problemu głębiej, choćby wykonując pomiar temperatury na powierzchni procesora za pomocą kamery termowizyjnej. Nie uprawnione są też, przynajmniej moim zdaniem, stwierdzenia ze str. 86, że CFD dobrze przewiduje wyniki doświadczeń. Zabrakło mi także szczegółów w jaki sposób i gdzie Autor policzył temperaturę procesora.
 5. Obliczenia i wykresy na str. 84-86, moim zdaniem, wcale nie prezentują bilansu energii, jak twierdzi Autor. Wykresy te powstały przez odniesienie każdej z analizowanych wielkości do ich sumy (w ten sposób wszystkie te wielkości sumują się do 100%). Należy zauważyć, że bilans energii wymaga zdefiniowania strumienia energii doprowadzanej do układu i strumienia energii wyprowadzanej z układu i do tych dwóch wielkości należałoby odpowiednio odnosić poszczególne pozycje bilansu (tak jak na wykresie Sankey'a).
 6. Szkoda, że w pracy nie zamieszczono informacji dotyczących średnic nanocząstek tworzących nanopłyn i informacji jaki był rozkład średnic tych nanocząstek. Na tym tle warto byłoby też wspomnieć o problemie sedymentacji nanocząstek.

5. UKŁAD PRACY, JEZYK I KWESTIE EDYTORSKIE

Układ pracy nie jest do końca standardowy. O kwestiach dotyczących przeglądu literatury wspominałem już wcześniej. Szata graficzna rozprawy jest generalnie staranna. Język użyty w pracy jest zasadniczo prawidłowy i tylko w paru miejscach wymagałby korekt – poniższa lista zawiera listę ważniejszych, dostrzeżonych przeze mnie podczas lektury pracy, uchybień edytorskich:

- rozdział drugi (nienumerowany) definiuje *Cel pracy*. Szkoda, że Autor nie podał w tym miejscu żadnego uzasadnienia dlaczego zdecydował się na taką właśnie pracę. Zwykle bowiem cel pracy wynika z przeglądu literatury i identyfikacji zagadnień niedostatecznie rozpoznanych. Tymczasem przegląd literatury nie jest wyodrębnionym rozdziałem/podrozdziałem i trochę ginie obok innych informacji. Wspominałem już o tym w rozdziale 2 niniejszej recenzji.
- tradycyjnie, w rozdziale gdzie definiowany jest cel pracy, Autor informuje też o zakresie swoich działań (zakresie pracy).
- pisząc o właściwościach nanopływu, np. na str. 11, pisząc o cieple właściwym, Autor powinien sprecyzować jego jednostkę: kJ/(kg·K) czy kJ/(kmol·K) lub podać wyraźnie czy chodzi o wielkość masową czy molową.
- str. 18, objaśnienia do równania (1.13) – sformułowanie ... *współczynnik przewodzenia ciepła materiału w postaci masowej*... brzmi niefortunnie.
- str. 22, przedostatnie zdanie w podrozdziale 1.4.3. – jest ... *przewodność cieplną płynu*... a winno być ... *przewodność cieplną płynu*....
- str. 23, drugie zdanie w podrozdziale 1.4.6. – jest ... *przewodność cieplną nanopłynów*... a winno być ... *przewodność cieplną nanopłynów*....

- wielkość \dot{q} powinna być nazywana gęstością strumienia ciepła, a nie samym strumieniem ciepła – np. str. 25.
- Autor używa w pracy dwóch symboli: η oraz μ na oznaczenie tej samej wielkości, a mianowicie współczynnika lepkości dynamicznej.
- mam poważne wątpliwości czy na pewno potrzebne są wszystkie informacje zawarte w podrozdziale 2.2. poświęconemu modelowaniu turbulencji. Informacje te Doktorant przytoczył na podstawie powszechnie dostępnej literatury i w większości w ogóle nie wykorzystał w dalszej części pracy. Uważam, że ten podrozdział można by spokojnie skrócić do opisu modelu $k-\varepsilon$ wykorzystywanego osobiście przez Autora.
- str. 40, wiersz 18 – jest ... *badano przepływ laminarny* ... a winno być ... *badano przepływ laminarny*....
- str. 43, drugie zdanie od góry – zdanie ... *Technika aktywna wykorzystuje oddziaływanie efektów zewnętrznych* ... brzmi niefortunnie. Ponadto zdanie to nie jest poprzedzone spacją („przykleja się” do zdania poprzedniego).
- str. 43, przedostatnie zdanie w drugim akapicie – jest ... *dynamicznym współczynnikiem lepkości*... a powinno być ... *współczynnikiem lepkości dynamicznej*....
- str. 43, przedostatnie zdanie na dole strony – jest ... *analizują powszechniejszym przypadkiem*... a powinno być ... *analizowany jest powszechniejszy przypadek* ...
- numer pierwszego równania na str. 51 wymaga korekty.
- str. 66, piąty wiersz od góry – jest ... *odpowiadały wartością rzeczywistym*... a powinno być ... *odpowiadały wartościami rzeczywistym*....
- str. 71, czwarty wiersz od góry – jest ... *występowanie w tym obszarze niżej temperatury*... a powinno być ... *występowanie w tym obszarze niższej temperatury*....
- str. 87, pierwsze zdanie na stronie – jest *Zagadnienia w których występuje przepływ płynu i ciepła w kanałach pierścieniowych związane są*... a powinno być *Zagadnienia, w których występuje przepływ płynu i ciepła w kanałach pierścieniowych, związane są*....
- str. 87, pierwsze zdanie na stronie – brakuje kropki na końcu tego zdania.
- str. 93, pierwsze zdanie w podrozdziale 5.3. – jest ... *otrzymanej wyniku*... a powinno być ... *otrzymanej w wyniku*....

6. WNIOSEK KOŃCOWY

Podsumowując moją ocenę rozprawy doktorskiej mgr. inż. Mateusza Korpysia pragnę stwierdzić, że recenzowana praca zawiera kilka nowych, wartościowych rezultatów i wnosi poznawczy wkład do analiz cieplno-przepływowych procesów konwekcyjnego transportu ciepła w układach z udziałem nanopłynu CuO-woda. Autor udowodnił, że posiada wystarczające umiejętności zarówno budowania modeli matematycznych, jak i wykonywania symulacji komputerowych tych procesów. Doktorant zademonstrował też podstawową wiedzę i umiejętności w zakresie walidacji eksperymentalnych budowanych przez siebie modeli matematycznych.

Układ logiczny rozprawy jest poprawny natomiast argumentacja Autora oraz strona redakcyjna pracy wymagają pewnych korek. Moje uwagi o charakterze krytycznym i polemicznym, choć wymagają od Doktoranta odniesienia się do nich, to jednak nie podważają głównego celu ani rezultatów pracy. Autor wykazał się wystarczającymi umiejętnościami samodzielnego formułowania problemów naukowych i ich rozwiązywania. Uważam więc, że

przedstawiona praca doktorska mgr. inż. Mateusza Korpysia pt. **Analiza wnikania ciepła w wybranych układach przy przepływie nanopłynu CuO-woda** odpowiada warunkom stawianym rozprawom doktorskim i może być dopuszczona do publicznej obrony. Doktorant może ubiegać się o nadanie stopnia naukowego doktora w dyscyplinie Inżynieria Chemiczna.

Nowak