dr hab. inż. Jerzy Hapanowicz,
prof. Politechniki Opolskiej

Opole 3.06.2013r.

POLITECHNIKA ŚLĄSKA BIBLIOTEKA GŁÓWNA

RECENZJA
rozprawy doktorskiej mgra inż. Michała Drzazgi pt.:
Badanie właściwości cieplno-przepływowych nanopłynów na bazie CuO i Al_2O_3 domieszkowanych wybranymi substancjami typu DRA

Promotor: dr hab. inż. Andrzej Gierczycki, prof. Politechniki Śląskiej

1. Ocena celowości podjęcia tematu

Coraz łatwiejszy dostęp do dużej gamy komercyjnych substancji wytwarzanych w ramach szerokorozumianej nanotechnologii sprawia, że niektóre procesy technologiczne realizowane z ich udziałem są prowadzone bardziej efektywnie, a produkty finalne wykazują cechy dotychczas nieosiągalne. Obszar możliwego wykorzystania nanocząstek (nawet ich jednego, konkretnego rodzaju) nie do końca jest jednak poznany. Analiza istniejącego stanu wiedzy wskazuje, że różne grupy badaczy lub inżynierów-praktyków postulują wykorzystanie tej samej nanosubstancji do osiągnięcia zupełnie innych celów. Przykładem mogą być nanoproszki, które z jednej strony pozwalają np. modyfikować właściwości powierzchni ciał stałych, z drugiej zaś, ich rozproszenie w cieczy daje możliwość uzyskania istotnej zmiany jej właściwości fizycznych. Okazuje się przy tym, że w zależności od potrzeb sprawą otwartą pozostaje rodzaj, stężenie oraz rozmiar nanocząstek, których obecność ma wywołać zmianę określonych cech fizycznych substancji. Z doniesień literaturowych wynika, że w celu zwiększenia przewodności cieplnej cieczy korzystne jest wprowadzenie do niej niewielkich ilości nanocząstek tlenku miedzi lub glinu. Korzystanie z takiej nanozawiesiny, jako nośnika energii cieplnej, pozwala zwiększyć efektywność działania różnego typu rekuperatorów, bez istotnej zmiany ich konstrukcji lub gabarytów. Jednak obecność nanocząstek w cieczy i wynikające stąd różnego rodzaju interakcje sprawiają, że jej lepkość rośnie, a niekiedy zmienia się nawet jej charakter reologiczny. Wzrost lepkości substancji skutkuje wzrostem zapotrzebowania na energię konieczną do jej przepływu. Zatem wzrost przewodności cieplnej płynu skutkować może wyższymi kosztami jego tłoczenia, co poddaje w wątpliwość opłacalność jego stosowania. Jednak podejmowane są próby takiej modyfikacji właściwości nanopłynów, ażeby opory ich przepływu były możliwe małe. W tym celu stosowane są tzw. dodatki (DRA), których zadaniem jest obniżenie tych oporów. Jednak sprawą otwartą pozostaje rodzaj dodatku oraz ustalenie jego ilości, która wprowadzona do nanozawiesiny wywoła pożądany efekt obniżenia zapotrzebowania energii do jej tłoczenia. Jedynym skutecznym sposobem uzyskania stosownych informacji na ten temat jest analiza wyników badań eksperymentalnych, czemu poświęcona jest recenzowana rozprawa doktorska.

Mając wszystko powyższe na uwadze sądzę, że temat pracy jest ważny i aktualny. Autor rozprawy prawidłowo ustalił i zinterpretował problem badawczy, jasno nakreślił cele do osiągnięcia oraz ustalił zakres koniecznych do wykonania badań naukowych. Pewne wątpliwości (natury dyskusyjnej) może wzbudzać jednak zakres wykonanych eksperymentów. Uważam, że jest on aż nadto rozbudowany, przez co praca ma charakter wielowątkowy, niezmiernie trudny do powiązania w jedną całość w ramach jednej, realizowanej samodzielnie rozprawy naukowej.

2. Formalna ocena układu i treści rozprawy

Merytoryczna treść rozprawy składa się z siedmiu rozdziałów o łącznej objętości 120 stron, po których zamieszczono wykaz oznaczeń, bibliografię, spis tabel i rysunków oraz polsko- i angielskojęzyczne streszczenie.

Po krótkim wstępie oraz sformułowaniu celu i zakresu rozprawy, autor przechodzi do opisu i analizy istniejącego stanu wiedzy, odnośnie zagadnień będących przedmiotem jego pracy naukowej. Przedstawia informacje dotyczące właściwości nanopłynów, a w szczególności ich lepkości, oporów przepływu, przewodności cieplnej oraz zachodzącego w nich zjawiska wnikania ciepła. Podaje również możliwe przykłady zastosowania nanopłynów, jako nośników ciepła. Osobny rozdział poświęca charakterystyce zjawiska redukcji oporów przepływu, opisując wywołujące to zjawisko dodatki typu DRA oraz opisując ich przewidywany wpływ na właściwości cieplne nanopłynów. Opis zagadnień wynikający z tzw. „przeglądu literatury" zajmuje ok. 1/3 objętości merytorycznej treści pracy.

Pozostała jej część dotyczy przebiegu i wyników prac własnych autora. Opisano w niej stanowisko badawcze, aparaturę pomiarową oraz metodykę prowadzenia eksperymentów. Scharakteryzowano substancje przewidziane do prowadzenia badań przepływowych oraz omówiono sposób preparacji nanopłynów. Najbardziej obszerną część pracy poświęcono analizie wyników własnych eksperymentów i zakończono kilkustronicowym podsumowaniem i wnioskami.

Lektura treści rozprawy skłania do kilku uwag natury ogólnej. W żaden sposób nie obniżają one jednak jej poziomu merytorycznego i dlatego nie oczekuję od autora szczegółowych odpowiedzi na ich temat. Jako ważniejsze z tych uwag należy jednak wymienić:

1. Ciecz bazową oraz nanopłyny z domieszką substancji typu DRA autor niezbyt zasadnie, aczkolwiek dość konsekwentnie, nazywa „roztworami" tych domieszek. Jest to dyskusyjne, gdyż z jednej strony trudno nazywać roztworem mieszaninę zawierającą dodatek w ilości rzędu setek, czy nawet tysięcy ppm, z drugiej zaś, przedmiotem badań była przecież ocena możliwości obniżenia oporów przepływu cieczy bazowej lub nanopłynu, a nie roztworów dodatków.
2. Rozprawa zawiera spis oznaczeń, sporządzony wg obowiązujących zasad. Jednak autor niekonsekwentnie stosuje indeksację symboli. Przykładowo, w jednym przypadku indeks „n" dotyczy nanopłynu (np. η_n), w innym ten sam indeks wskazuje na właściwość nanocząstki (np. λ_n). Z kolei symbol liczby Nusselta dla nanopłynu opatrzono indeksem „np". Brak konsekwencji w przyjętych oznaczeniach wyraźnie utrudnia lekturę pracy. Niezbyt celowe wydaje się też umieszczenie w spisie oznaczeń parametrów występujących jedynie w konkretnych równaniach. Skoro np. parametr B dotyczy tylko zależności (13) i nie występuje w innych częściach pracy, to wystarczający byłby jego opis jedynie w stosownym miejscu tekstu.
3. Rozprawa zawiera Bibliografię składającą się ze 164 pozycji. W tekście nie odnalazłem jednak odwołania do informacji zawartych w pracach [105] i [149]. Niezbyt poprawny jest również sposób przywołania niektórych źródeł. Przykładowo, na stronie 37. autor przywołuje pracę Tomsa [76], a na 40. pracę Virka z 1967r. [138], co nie jest zgodne z załączonym wykazem. Jeżeli przywoływane prace Tomsa i Virka zostały wykorzystane w pracach [76] i [138], natomiast autor rozprawy nie miał do nich bezpośredniego dostępu, to należało przywołać oryginalny materiał źródłowy, wskazując jednocześnie na pozycje [37] i [138] jako te, w których stosowne informacje były zawarte. Prawidłowy sposób przywołania źródła w opisanej sytuacji autor zastosował jednak na str. 20. rozprawy w odniesieniu do pracy [125]. Wątpliwe jest również, chociaż mogę się mylić, czy ze względu na datę publikacji autor rzeczywiście korzystał ze źródeł [12], [31], [34], a zwłaszcza z pracy [86] datowanej na 1881 rok.
4. W literaturze (zwłaszcza anglojęzycznej) przyjęło się stosować symbol „f" dla oznaczenia współczynnika Fanninga, którego wartość jest czterokrotnie mniejsza od współczynnika liniowych oporów przepływu. Aczkolwiek autor rozprawy uwzględnił ten fakt w postaciach stosownych równań przywołanych z literatury przedmiotu, to jednak można było przynajmniej wspomnieć o tym w tekście pracy, a tym samym nie wzbudzać wątpliwości u czytelnika.
5. Za zbędne uważam umieszczenie na końcu rozprawy wykazów tabel i rysunków, chociaż zdaję sobie sprawę, że zapewne autor chciał uwzględnić przyjęty na Wydziale szablon prac doktorskich. W żaden sposób wykaz ten nie ułatwia lektury tekstu, a jedynie zwiększa objętość pracy. Rozprawa doktorska nie jest poradnikiem, z którego miałoby korzystać szerokie grono czytelników-praktyków. Jeżeli tak miałoby być, to wykaz powinien odnosić się także do zamieszczonych w pracy równań, które opisują istotne zjawiska i parametry substancji.

6. Pewne wątpliwości budzić może układ pracy w tej jej części, która dotyczy badań własnych autora. Moim zdaniem opis wyników eksperymentów dotyczących własnej oceny współczynnika przewodzenia ciepła nanopłynów oraz ich stabilności powinien być zamieszczony (a stosowne pomiary wykonane) przed opisem wyników badań oporów przepływu. Do wyników tych eksperymentów należało się również odnieść w punkcie 5.1., dotyczącym doboru materiału badawczego. Brak takiego układu sprawia, że autor w pierwszej kolejności prezentuje wyniki badań dotyczących efektu redukcji oporów przepływu danego nanopłynu, a dopiero później stwierdza, że jest on niestabilny lub, że jego współczynnik przewodzenia ciepła jest niezadawalająco niski.
7. Autor niezbyt poprawnie stosuje pewne nazewnictwo. Synonimem współczynnika przewodzenia ciepła jest przewodność cieplna a nie przewodnictwo cieplne, które jako takie jest zjawiskiem, a nie cechą substancji. Również wnikanie ciepła nie jest właściwością nanopłynu, a zachodzącym w nim zjawiskiem ruchu ciepła. Stosowane zamiennie pojęcia: stężenie objętościowe i ułamek objętościowy dobrze byłoby zastąpić bardziej adekwatnym mianem „udział objętości".
8. W treści rozprawy, za spisem oznaczeń, zamieszczono wykaz skrótów stosowanych w tekście. Jest to celowe, gdyż nazwy niektórych związków chemicznych są bardzo rozbudowane, trudne w lekturze, a niekiedy zachodzi potrzeba ich kilkukrotnego wykorzystania w jednym krótkim akapicie. Jednak wskazane w tym wykazie skróty DR, DRR i TRD powinny znaleźć się również w wykazie symboli, gdyż występują w przytaczanych w pracy równaniach.

Treść rozprawy zawiera pewną liczbę drobnych uchybień językowych, głównie o charakterze redakcyjnym. Ich szczegółowy wykaz przekazałem (wraz z omówieniem) autorowi rozprawy w trakcie bezpośredniego spotkania. Przekazane uwagi być może okażą się pomocne podczas redagowania tekstu innych publikacji.

3. Uwagi merytoryczne do treści rozprawy

Lektura rozprawy skłania do postawienia kilku pytań merytorycznych, na które spodziewam się uzyskać szczegółowe odpowiedzi jej autora. Aczkolwiek pytana te mają charakter dyskusyjny, to jednak jednoznaczne wyjaśnienie związanych z nimi wątpliwości może dodatkowo podnieć wartość naukową rozprawy, tak ważną w trakcie jej obrony.

1. Uwzględniając typowo eksperymentalny zakres pracy, rozprawa zawiera zbyt mało informacji dotyczących warunków wykonania eksperymentów i dokładności uzyskanych na ich podstawie wyników. Podane zostały zakresy pomiarowe mierników, jednak nie określono dokładności wskazań tych przyrządów. Nie przytoczono również postaci równania, według którego ustalano wartości f zgodnie z danymi pomiarowymi. Brak jest oceny dokładności uzyskiwanych na jego podstawie wartości, z uwzględnieniem błędu pomiaru ciśnienia, natężenia przepływu i gęstości substancji. Jest to o tyle istotne, że wyniki części swoich badań autor porównuje z wynikami empirycznych równań innych badaczy.
2. W punkcie 5.3.2. autor opisuje wyniki kalibracji stanowiska do pomiaru oporów przepływu. Stwierdza przy tym, że w odniesieniu do przepływu czystej wody różnice pomiędzy wartościami zmierzonymi i obliczonymi z zależności Blasiussa (55) są rzędu do 10%, co uznaje za wystarczającą dokładność. Jeżeli podobnych niedokładności pomiaru oczekiwano również w przypadku badania nanopłynów, to powstaje pytanie: jaka była dokładność wyznaczania współczynnika redukcji oporów wg równania (52), które zawiera wyznaczone eksperymentalnie z dokładnością do 10% wartości f dla różnych płynów?
3. Wyjaśnienia wymaga również sposób ustalania wartości f cieczy bazowej dla potrzeb stosowania równania (52), na podstawie którego obliczano współczynnik redukcji oporów. Były to wartości zmierzone bezpośrednio, czy też w jakiś sposób obliczane? Analiza układu punktów na wykresach ilustrujących wyniki badań własnych autora pozwala twierdzić, że nie były to wartości zmierzone. Dlaczego?
4. Dyskusyjne jest przyjęcie dla potrzeb analizy wyników badań oporów przepływu nanopłynów wartości liczby Reynoldsa ustalonej jedynie dla cieczy bazowej. Aczkolwiek autor na stronie

40. rozprawy uzasadnia takie podejście, to jednak należy pamiętać o tym, że liczba Reynoldsa ma swój sens fizyczny. Wyraża ona m.in. intensywność zaburzeń w płynącej substancji, a te są w dużej mierze odpowiedzialne za transport masy, ciepła oraz wymianę pędu. Poziom tych zaburzeń związany jest z lepkością płynu, która w warunkach badań własnych autora nie była parametrem stałym. Poza tym, przy stałej lepkości i gęstości cieczy bazowej płynącej w rurze o danej średnicy wartość Re wynika jedynie ze zmian średniej prędkości przepływu. Zatem bardziej uzasadnione i wystarczające było uzależnienie wartości f oraz DR jedynie od tej prędkości. W ten sposób wskazywany przez autora związek pomiędzy wartością krytycznej liczby Reynoldsa (dla maksimum redukcji oporów) i średnicą rur odpowiadać może jednej stałej prędkości cieczy bazowej, przy której obecność określonej ilości dodatku wywołuje maksymalny efekt redukcji oporów. Z powyższego opisu wynikają dwa pytania: czy podczas analizy wyników badań autor próbował w miejsce Re korzystać jedynie z prędkości średniej oraz, czy dysponując wynikami pomiarów właściwości reologicznych starał się ustalić wartości Re dla płynu nieniutonowskiego, zwłaszcza dla rozrzedzanych ścinaniem nanopłynów CuO?

5. W odniesieniu do części wyników swoich badań autor rozprawy tłumaczy brak efektu redukcji oporów tym, że przy małym stężeniu DRA jego elementy adsorbują się na nanocząstkach, nie biorąc tym samym udziału w zmianach właściwości warstwy przyściennej. Jest to tłumaczenie z gruntu poprawne, jednak rodzi pytanie: a co z cząstkami DRA zaadsorbowanymi na ścianie rury? Zapewne jej powierzchnia nie była z nich dokładnie „czyszczona" przed rozpoczęciem serii pomiarów z wykorzystaniem kolejnych, odpowiednio spreparowanych nanopłynów? Czy autor rozprawy w jakiś sposób miał ten fakt na uwadze, analizując wyniki eksperymentów?
6. Analiza materiałów źródłowych dotyczących równań (10), (11) i (12) wskazuje, że udział objętości nanocząstek powinien być w nich wyrażany w procentach. Jest to o tyle istotne, że autor wykorzystał te równania do obliczeń porównawczych lepkości wytworzonych przez siebie nanopłynów (Tabele 3, 4, 9, 7, 12), podstawiając w nich jednak udział w postaci ułamka. Co prawda, poprawne skorzystanie z przywołanych równań także nie daje zadawalających wyników w stosunku do opisu badań własnych autora, jednak rodzi pytanie: czy cytowane w pracy zależności wyrażające lepkość nanopłynów przywołane zostały bezkrytycznie? Przykładowo, równanie (17) po uwzględnieniu miana współczynnika wyrażonego przez (20) jest niejednorodne wymiarowo. Z kolei wg równania (16) lepkość nanopłynu o temperaturze 293 K i o zawartości nanocząstek 1 % obj. okazuje się być ujemna.
7. W punkcie 5.3.3. rozprawy autor podaje, że pomiar spadków ciśnienia przy wykorzystaniu komputerowego układu zbierania danych trwał dla każdego z badanych natężeń przepływu 100 sekund. W tym czasie zbierano 200 danych, których wartości uśredniano. Można zapytać, dlaczego pomiar trwał aż tak długo? Czy autor planował również ocenę dynamiki zjawisk zachodzących w płynącej substancji? Raczej nie, gdyż częstotliwość próbkowania wynosiła jedynie 0,5 Hz. Czy autor nie obawia się, że wyniki tak długiego pomiaru mogły zostać zafałszowane przypadkowymi zakłóceniami w elektrycznym torze pomiarowym? Czym można bowiem wytłumaczyć rozrzut punktów pomiarowych dla wody, wyraźnie widoczny na wykresach ilustrujących wyniki badań oporów przepływu? W warunkach ustalonego jednofazowego przepływu nieściśliwego płynu niutonowskiego, punkty wynikające z pomiaru oporów powinny ułożyć się na wykresie niemalże wg jednej linii. Być może zagadnieniem do wyjaśnienia pozostaje nadal ocena dokładności pomiarów, której w rozprawie nie przedstawiono.

4. Konkluzja i jej uzasadnienie

Pomimo wskazanych uwag krytycznych, rozprawę pod względem merytorycznym oceniam jako dobrą. Zarówno uwagi ogólne, jaki i merytoryczne mają charakter dyskusyjny lub wymagają jedynie krótkiego komentarza autora, co jest typowe dla niemal każdej rozprawy doktorskiej. Istotny jest natomiast fakt, że praca nie zawiera istotnych błędów rzeczowych, zarówno w odniesieniu do planowania i wykonania eksperymentów, jak też w stosunku do interpretacji i opisu ich wyników.

Do osiągnięć naukowych autora rozprawy zaliczam:

- umiejętny dobór tematu i poprawne zidentyfikowanie problemu, dokonane w oparciu o analizę istniejącego stanu wiedzy,
- poprawne opanowanie warsztatu naukowego w zakresie planowania i wykonania złożonego eksperymentu,
- wykazanie się umiejętnością samodzielnego korzystania z różnorodnych, złożonych technik i procedur pomiarowych,
- umiejętne stawianie hipotez i ich weryfikacja z wykorzystaniem krytycznej analizy wyników własnych eksperymentów,
- wskazanie na warunki korzystne dla uzyskania efektu redukcji oporów przepływu nanopłynów, jako efektywnych nośników ciepła w rekuperatorach,
- rozpoczęcie szeroko zakrojonych badań dodatkowych, których wyniki być może pozwolą w przyszłości na jeszcze szersze poznanie i bardziej szczegółowe opisanie zagadnień będących głównym tematem rozprawy doktorskiej.

Powyższe osiągnięcia mogą świadczyć o istotnym rozwoju naukowym autora rozprawy oraz o nabyciu przez niego umiejętności samodzielnej pracy badawczej.

Reasumując uważam, że mgr inż. Michał Drzazga wykazał się umiejętnością prowadzenia badań naukowych, zdolnością krytycznej analizy ich wyników oraz samodzielnego formułowania wynikających z tej analizy wniosków. Jego rozprawa doktorska zawiera elementy nowości naukowej, a jednocześnie treści o znaczeniu aplikacyjnym, ważne dla rozwiązań praktycznych. Przedmiot i zakres rozprawy mieści się w dyscyplinie *Inżynieria chemiczna*, szczególnie w zakresie projektowania oraz eksploatacji aparatów i układów przepływowych.

Moim zdaniem recenzowana rozprawa spełnia warunki stawiane pracom doktorskim przez zapisy obowiązującej w tym zakresie *Ustawy* i dlatego wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony.