

Prof. dr hab. inż. Dawid Taler
Politechnika Krakowska
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Katedra Procesów Ciepłych, Ochrony Powietrza
i Utylizacji Odpadów
ul. Warszawska 24
31-155 Kraków

Kraków, 27.01.2021 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Dąbrowskiego
pt. „Badania nierównomierności rozptywu płynu w mini i mikrokanalach wymiennika”

1. Podstawa formalna wykonania recenzji

Recenzję pracy doktorskiej mgr inż. Pawła Dąbrowskiego wykonano na podstawie pisma L.dz. 203/2020/WM Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej.

2. Charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Dąbrowskiego o objętości 87 stron składa się z 7 rozdziałów, wykazu ważniejszych oznaczeń i skrótów, spisu literatury cytowanej, wykazu rysunków i tabel oraz 6 załączników. Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. inż. Dariusz Mikielewicz, a promotorem pomocniczym dr inż. Michał Klugmann.

Rozprawa mgr inż. Pawła Dąbrowskiego dotyczy ważnej grupy aparatów służących do wymiany ciepła, jakimi są mini i mikrowymienniki ciepła.

Przedmiotem rozprawy są badania eksperymentalne i symulacje CFD (Computational Fluid Mechanics) nierównomierności rozptywu płynu w kanałach wymiennika. Badano przepływy jednofazowe adiabatyczne i z uwzględnieniem wymiany ciepła, tj. z uwzględnieniem zmian temperatury przepływającego czynnika. Przeprowadzono badania eksperymentalne 10 różnych minikanalowych i miniszczelinowych wymienników ciepła o powierzchni prostej oraz rozwiniętej o 7 różnych średnicach hydraulicznych. Modelowanie CFD przeprowadzone zostało dla pojedynczej miniszczeliny o średnicy hydraulicznej równej 1 980 μm oraz 50 równoległych minikanalów o średnicy hydraulicznej równej 1 000 μm , połączonych na wlocie i wylocie kolektorami zbiorczymi o 4 różnych kształtach: prostokątnym, trapezowym, trójkątnym i wypukłym. Czynnikiem roboczym, który przepływał przez minikanaly była woda lub etanol. Badania przeprowadzono przy różnych strumieniach masy wymienionych czynników, również przy zastosowaniu stopnia (progu w kolektorach). Wyznaczana była nierównomierność rozptywu czynnika na poszczególne kanały. Przebadano 5 różnych przypadków: kolektor konwencjonalny bez stopnia oraz 4 kolektory ze stopniem o wysokości 0,5 ; 1 ; 3 oraz 7 mm. Zarówno badania, jak i symulacja CFD pokazują, że wprowadzenie progów w kolektorach zbiorczych, podwyższa równomierność strumienia masy płynu przez poszczególne kanały.

We wprowadzeniu stanowiącym pierwszy rozdział rozprawy podkreślono celowość rozwoju mikrowymienników spowodowaną miniaturyzacją aparatów i urządzeń skutkującą wysoką wartością gęstości strumieni ciepłych odprowadzonych do otoczenia. Średnia

gęstość strumienia ciepła dla procesorów komputerowych wynosi od 2 do 4,5 MW/m² a dla tranzystorów bipolarnych z izolowaną bramką nawet od 6,5 do 50 MW/m². Podane wartości gęstości strumienia ciepła znacznie przekraczają wartości gęstości strumienia ciepła występujące w dużych urządzeniach energetycznych, np. na powierzchni ścian komór paleniskowych kotłów gęstość strumienia ciepła nie przekracza zwykle 0,6 MW/m² a na powierzchni prętów paliwowych w reaktorach jądrowych około 1 MW/m². Aby nie dopuszczać do zbyt wysokich temperatur elementów elektronicznych należy zapewnić intensywne ich chłodzenie. Jedną z opcji, które można zastosować są mikro i mini-wymienniki o bardzo małej średnicy kanałów, przez które przepływa płyn chłodzący. Gęstość strumienia ciepła na powierzchni ciała stałego jest wprost proporcjonalna do współczynnika wnikania ciepła oraz różnicy między temperaturą powierzchni ciała i średnią masową temperaturą płynu w analizowanym przekroju. Najczęściej stosowanym sposobem zwiększania współczynnika wnikania ciepła na powierzchni ciała stałego jest zastosowanie żeber w przypadku chłodzenia elementu elektronicznego powietrzem. Przy dużej gęstości ożebrowania efektywny współczynnik wnikania ciepła może być nawet kilkadziesiąt razy większy od rzeczywistego współczynnika wnikania ciepła na powierzchni bez żeber. Innym sposobem osiągania wysokich wartości gęstości odprowadzanego strumienia ciepła jest zastosowanie chłodzenia mikro lub mini kanałowego. Z uwagi na bardzo małą średnicę hydrauliczną kanałów, przepływ płynu jest laminarny. Dla rozwiniętego hydraulicznie i termicznie przepływu laminarnego, liczba Nusselta wynosi 3,66 gdy temperatura powierzchni kanału jest stała lub 4,36 gdy na powierzchni kanału zadana jest stała gęstość strumienia ciepła. Uwzględniając, że współczynnik wnikania ciepła oblicza się ze wzoru $\alpha = Nu \lambda_p / D_h$, widać że zmniejszając średnicę hydrauliczną kanału, można w przepływie laminarnym uzyskać bardzo wysokie wartości współczynnika wnikania ciepła. Należy jednak pamiętać o tym, że wysoką wartość gęstości strumienia ciepła na powierzchni elementu konstrukcyjnego uzyskamy tylko wtedy, gdy różnica między temperaturą powierzchni i płynu jest wysoka, tj. należy unikać znacznego podwyższania temperatury przepływającego płynu.

Aby zapewnić małą różnicę temperatury płynu między wylotem a wlotem kanału, strumień masy płynu powinien być duży, co z kolei jest przyczyną dużego spadku ciśnienia na długości (kanału) wymiennika i wzrostu zużycia energii do przetłaczania płynu przez wymiennik.

Zastosowanie mikro lub minikanałowych wymienników ciepła do chłodzenia intensywnie nagrzewanych elementów napotyka trudności z uwagi na blokowanie przepływu płynu przez kanały przez zanieczyszczenia, a także z uwagi na występowanie nierównomiernego przepływu czynnika przez równoległe kanały na szerokości całego wymiennika.

W rozdziale 2 dokonano przeglądu publikacji pod kątem podziału kanałów z uwagi na ich średnicę hydrauliczną. Kandlikar i Grande zaproponowali następującą klasyfikację:

- kanały konwencjonalne, gdy $D_h > 3 \text{ mm}$,
- minikanały, gdy $0,2 < D_h \leq 3 \text{ mm}$,
- mikrokanały, gdy $10 < D_h \leq 200 \text{ }\mu\text{m}$.

Nierównomierność przepływu przez równoległy układ kanałów w mini wymiennikach ciepła jest przedmiotem rozdziału 3.

Z uwagi na różne długości drogi przepływu płynu od kolektora wlotowego poprzez układ równoległych minikanałów w wymienniku do kolektora wylotowego, na szerokości wymiennika występuje nierównomierność prędkości i temperatury płynu w poszczególnych kanałach. Nierówność rozptyłu czynnika w poszczególnych kanałach w wymienniku można scharakteryzować za pomocą prostych wzorów, biorąc pod uwagę prędkości płynu w poszczególnych kanałach albo strumień masy lub spadki ciśnienia na poszczególnych kanałach lub też temperaturę płynu na wylocie z kanałów. Kandydat przeprowadził szczegółowy przegląd prac dotyczących nierównomierności przepływu płynu przez

równoległy układ minikanalów i miniszczelin. W rozprawie doktorskiej przebadano wpływ wybranego kształtu kolektora na nierównomierność rozptywu w minikanalowych oraz miniszczelinowych wymiennikach ciepła. Mgr inż. Paweł Dąbrowski zaproponował modyfikację kształtu kolektorów w celu zmniejszenia nierównomierności przepływu płynu na szerokości wymiennika podkreślając różnice między minikanalami a miniszczelinami. Zaproponowana została metoda do obliczania współczynnika nierównomierności rozptywu w wymiennikach miniszczelinowych, biorąc pod uwagę dwuwymiarowy charakter przepływu płynu.

W rozdziale czwartym sformułowana została teza pracy. Kandydat stwierdza, że największy wpływ na nierównomierny rozptyw czynnika w wymienniku mają kolektory wlotowe i wylotowe. Wpływ tych kolektorów na nierównomierność rozptywu badany był głównie za pomocą modelowania CFD. Bardzo niewiele prac dotyczy nierównomierności rozptywu w wymiennikach mikroszczelinowych.

Kandydat postawił następującą tezę: Możliwa jest poprawa równomierności rozptywu płynu, która spowoduje zwiększenie sprawności w mini i mikro wymiennikach ciepła, poprzez odpowiednie zaprojektowanie kolektorów wlotowych oraz wylotowych. Ponadto stwierdza on, że jego rozprawa ma charakter przewodnika po jednotematycznym cyklu publikacji, obejmującym 2 publikacje autorskie w czasopismach: Applied Thermal Engineering i w Journal of Applied Fluid Mechanics oraz 4 publikacje współautorskie, w tym 2 w Archives of Thermodynamics, 1 w Applied Thermal Engineering oraz 1 w Journal of Applied Fluid Mechanics.

W rozdziale 5 przedstawiona została metodologia badań. Przeprowadzone zostały badania eksperymentalne i symulacje CFD 10 różnych minikanalowych i miniszczelinowych wymienników ciepła o powierzchni prostej i rozwiniętej różniących się średnicą hydrauliczną.

W celu zmniejszenia nierównomierności rozptywu, zmodyfikowano konstrukcję kolektorów zbiorczych, instalując w nich stopień. Modelowanie CFD przeprowadzono przy użyciu komercyjnego programu CFD ANSYS-FLUENT, V. 18.2. Modelowany był laminarny przepływ płynu z uwzględnieniem wymiany ciepła. Wyniki badań eksperymentalnych i symulacji CFD omówiono w rozdziale 6. Przeprowadzono badania dla przepływu adiabatycznego, jak i dla wymiennika minikanalowego z dostarczaniem ciepła do przepływającego płynu. Modelowanie CFD pokazało, że wprowadzenie progu w kolektorach zbiorczych zmniejszyło współczynnik nierównomierności rozptywu prawie dwukrotnie w miniszczelinowym wymienniku ciepła i trzykrotnie w wymienniku minikanalowym.

Podsumowanie, wnioski i kierunki dalszych badań przedstawione są w rozdziale 7.

3. Uwagi krytyczne

Można wskazać na następujące drobne niedociągnięcia i usterki zawarte w pracy, pomimo mojej wysokiej oceny badań eksperymentalnych, których wyniki szczegółowo są przedstawione i omówione w rozprawie.

1. Zarówno w temacie jak i całej rozprawie mówi się o nierównomierności rozptywu płynu i wymianie ciepła w mini i mikro wymiennikach ciepła, podczas gdy w rozprawie analizowane były pojedyncze sekcje (płyty) z równoległymi lub równoległymi i poprzecznymi minikanalami. Warunki pracy takiej płyty różnią się od warunków pracy płyty w konkretnym urządzeniu, w którym ciepło może być doprowadzane od dołu płyty lub warunków pracy sekcji stanowiącej element wymiennika płytowego współ-, przeciw-, lub krzyżowo-prądowego.
2. W równaniu (1.1) występuje symbol ΔT , bez jego dokładniejszego omówienia, np. czy jest to średnia logarytmiczna różnicy temperatury między temperaturą powierzchni ciała stałego i średnio-masową temperaturą czynnika, czy też jest to inna różnica temperatury.

3. W pracy przedstawione są wyniki pomiarów bez próby wyprowadzenia na ich podstawie korelacji na nierównomierność przepływu czynnika w funkcji parametrów geometrycznych badanej sekcji, prędkości płynu czy właściwości fizycznych badanych płynów.
4. Przy opisie równań zachowania masy pędu i energii dla laminarnego przepływu płynu Kandydat mówi o numerycznym rozwiązywaniu tego układu równań, nie wspominając o tym, że do rozwiązania tego układu zastosował program komercyjny ANSYS-FLUENT V.18.2.
5. We współautorskich publikacjach [A1]-[A4] na stronie 46, Kandydat nie podaje udziału procentowego poszczególnych autorów, a także nie podaje jakie zadania wykonał przy przygotowaniu danej publikacji. Informacje te podane są dopiero w załącznikach A1-A4.

4. Główne oryginalne osiągnięcia naukowe Kandydata przedstawione w rozprawie

Mgr inż. Paweł Dąbrowski pokazał w swojej rozprawie, że poprzez odpowiednią konstrukcję kolektorów wlotowych i wylotowych można znacznie poprawić równomierność rozprawy płynu na szerokości mini wymiennika, tj. zmniejszyć różnice w strumieniach masy płynu w poszczególnych minikanalach. Postawiona w rozprawie teza potwierdzona została za pomocą badań eksperymentalnych [A1]-[A4], jak i symulacji CFD [A5]-[A6].

Badania przepływu płynu w 51 równoległych minikanalach o prostokątnym przekroju poprzecznym połączonych trapezowym kolektorem wlotowym i wylotowym przeprowadzone zostały dla pięciu różnych średnic hydraulicznych. Mierzone były spadki ciśnienia i prędkości płynu w poszczególnych kanałach.

Na szczególną uwagę zasługują badania diabatyicznego przepływu etanolu z wrzeniem. Badania eksperymentalne przeprowadzone zostały dla różnych gęstości strumieni cieplnych doprowadzanych do badanej sekcji wymiennika oraz różnych strumieni masy przepływającego etanolu. Badana była sekcja z gładkimi miniszczelinami o średnicy hydraulicznej 1,98 mm oraz układ miniszczelin równoległych z dodatkowymi poprzecznymi kanałami oraz 23 otworami. Sekcja minikanalowa z 50 równoległymi kanałami o średnicy hydraulicznej 1mm porównana została z sekcjami miniszczelinowymi. Należy zaznaczyć, że kanał ma wysokość większą niż szerokość, a w przypadku szczeliny jej szerokość jest większa od wysokości. Wprowadzenie poprzecznych kanałów na powierzchni sekcji z minikanalami sprawia, że dodatkowe ścieżki przepływu dla powstających pęcherzyków pary wyrównują przepływ dwufazowy.

Dużym osiągnięciem praktycznym Kandydata jest przeprowadzenie obszernych symulacji CFD sekcji minikanalowych i miniszczelinowych z wykorzystaniem programu ANSYS-FLUENT. Modelowane były sekcje z kolektorami, wewnątrz których znajduje się próg na wlocie do układu równoległych kanałów. Zastosowanie progu wyrównuje strumień masy płynu przez poszczególne kanały. Modelowane były sekcje minikanalowe i miniszczelinowe zasilane przez kolektory konwencjonalne bez progu i z progiem o różnych wysokościach i kształtach.

Przeprowadzone zostały również badania eksperymentalne sekcji wymiennika ciepła z czterema kolektorami z progiem i bez progu o różnych kształtach przekroju poprzecznego: prostokątnym, trapezowym, trójkątnym i wypukłym. Progi miały wysokość 0,5 mm, 1 mm, 3mm oraz 7mm. Badanymi cieczami była woda i etanol, które przepływały przez 50 lub 51 równoległych minikanalów. Badania przepływów jednofazowych i przepływów z wrzeniem przeprowadzono dla 6 różnych średnic hydraulicznych.

5. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Dąbrowskiego spełnia z nadmiarem wymogi obowiązującej Ustawy o Stopniach i Tytule Naukowym i wnoszę do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Gdańskiej o dopuszczenie jej do publicznej obrony. Proponuję również wyróżnić rozprawę doktorską mgr inż. Pawła Dąbrowskiego.

Dawid Faler

Uzasadnienie wyróżnienia rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Dąbrowskiego

Proponuję wyróżnić rozprawę doktorską mgr inż. Pawła Dąbrowskiego, gdyż przeprowadził on obszerne badania eksperymentalne sekcji minikanalowych i miniszczelinowych wymienników ciepła. Zaproponował zastosowanie progów w kolektorach zasilających układ równoległych kanałów, aby wyrównać strumienie masy płynu przepływającego w poszczególnych kanałach. Postawioną w rozprawie tezę zweryfikował za pomocą badań eksperymentalnych i modelowania CFD przepływów jednofazowych adiabatycznych i diabatyicznych. Mgr inż. Paweł Dąbrowski opublikował wyniki przeprowadzonych badań eksperymentalnych i symulacji komputerowych w 6 artykułach, z których dwa to artykuły autorskie w czasopismach z bazy JCR. Również dwa artykuły współautorskie opublikowane zostały w czasopismach z listy JCR.

Wyżej wymienione osiągnięcia Kandydata w pełni uzasadniają wyróżnienie jego rozprawy.

Dawid Taler