



Politechnika Łódzka

Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska

Łódź, 20.05.2024

Profesor dr habil. Ireneusz Zbiciński

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Katarzyny Sindery pt. "Transport pędu i ciepła w wypełnieniach reaktorów strukturalnych wykonywanych metodami addytywnymi"

Praca mgr inż. Katarzyny Sindery wpisuje się w ważny obszar zastosowań inżynierii chemicznej i procesowej jakim jest ochrona środowiska i ochrona zdrowia. Działalność przemysłowa, np. produkcja energii czy działalność rolnicza powodują, między innymi, emisję gazów cieplarnianych, które wpływają istotnie na klimat. Idealną metodą, która radykalnie by ograniczyła negatywny wpływ działalności przemysłowej czy rolniczej na środowisko, było by osiągnięcie takiego modelu produkcji i konsumpcji, który doprowadziłby do „gospodarki o obiegu zamkniętym”. Gospodarka o obiegu zamkniętym oznacza, upraszczając, że surowce i odpady, powstałe w ramach produkcji czy po konsumpcji zostają w gospodarce i stają się źródłem surowców do następnego cyklu. Ten idealny model jest jeszcze daleki od realizacji ale samo jego zdefiniowanie określa przyszłe cele rozwoju technologii. W chwili obecnej, jednym ze sposobów ograniczenia emisji szkodliwych substancji jest ich redukcja poprzez zastosowanie reaktorów katalitycznych np. do oczyszczania przemysłowych gazów odlotowych czy w katalizatorach samochodowych, umożliwiające zmniejszenie emisji niebezpiecznych produktów spalania paliw kopalnych. W ostatnich latach prowadzone są intensywne prace nad rozwojem metod projektowania reaktorów katalitycznych, w tym katalitycznych reaktorów strukturalnych. W przemyśle dominują dwa klasyczne rozwiązania reaktorów katalitycznych: reaktory ze złożem usypanym oraz reaktory monolityczne.

Reaktory monolityczne charakteryzują się małymi oporami przepływu, ale też mniejszymi współczynnikami kinetycznymi transportu ciepła i masy pomiędzy warstwą katalityczną a przepływającym płynem w porównaniu do reaktorów ze złożem usypanym. Poszukuje się więc nośników katalitycznych, które zapewniałyby dużą powierzchnię właściwą wymiany masy, intensywny transport masy do powierzchni warstwy katalitycznej, a jednocześnie małe opory przepływu i znaczną wytrzymałość mechaniczną.

W literaturze brak jest prac zarówno teoretycznych jak i eksperymentalnych dotyczących badań krótkokanałowych nośników katalitycznych o opływowym kształcie ścianek; istniejące w literaturze korelacje eksperymentalne kinetyki transportu pędu, ciepła i masy dotyczą monolitów i złóż usypanych w strukturach krótkokanałowych.

Wyżej omówione zagadnienia były niewątpliwie jedną z motywacji podjęcia badań zjawisk przepływowych i kinetyki transportu ciepła i masy dla krótkokanałowych wypełnień strukturalnych reaktorów katalitycznych, tzw. struktur opływowych.

Celem rozprawy doktorskiej było określenie możliwości oraz warunków wykorzystania krótkokanałowych nośników katalitycznych o opływowym kształcie ścianek do redukcji emisji szkodliwych substancji. Szczególny nacisk został położony na określenie mechanizmu procesów transportu w strukturach opływowych reaktorów katalitycznych.

Mimo obszernej literatury tematu, brak jest zależności pomiędzy długością struktur krótkokanałowych, kształtem przekroju poprzecznego kanałów a kinetyką transportu ciepła i masy zwłaszcza dla ścianek krótkokanałowej struktury o geometrii opływowej, np. ukształtowanej na podobieństwo skrzydła samolotu.

Tak więc, podjęcie badań teoretycznych i eksperymentalnych w celu określenia możliwości zastosowania struktur opływowych jako potencjalnego wypełnienia strukturalnych reaktorów katalitycznych jest uzasadnione, aktualne i ważne.

Praca doktorska mgr inż. Katarzyny Sindery wpisuje się więc w istotny obszar rozwoju technologii projektowania krótkokanałowych wypełnień strukturalnych reaktorów katalitycznych w aspekcie zarówno analizy i doboru pożądanych struktur jak i badań nad mechanizmem i procesami transportu ciepła i masy w wypełnieniach reaktorów strukturalnych.

Praca doktorska mgr inż. Katarzyny Sindery jest rozprawą z zakresu inżynierii chemicznej w zastosowaniu do katalitycznego oczyszczania gazów w nowej generacji krótkokanałowych katalizatorów monolitycznych. Praca liczy 100 stron i ma charakter teoretyczno-eksperymentalny.

Praca Kandydatki jest podzielona na rozdziały poświęcone analizie aktualnego stanu wiedzy dotyczącej strukturalnych reaktorów katalitycznych, rodzajów wypełnień i możliwości zintensyfikowania transportu pędu, ciepła i masy w badanych strukturach.

W części dotyczącej strukturalnych reaktorów katalitycznych dokonano klasyfikacji istniejących rozwiązań, opisano typy nośników warstwy katalitycznej i ich właściwości w zastosowaniach do procesu adsorpcji, wytwarzania wodoru, selektywnego utleniania, redukcji NO_x, etc.

W części teoretycznej pracy wykonano wstępne obliczenia CFD dla krótkokanałowej struktury reaktora katalitycznego o geometrii opływowej (profil NACA 0006) oraz prostopadłościennej o kwadratowym kształcie przekroju poprzecznego kanałów. Wykazano, że zastosowanie ścianek opływowych krótkokanałowej struktury reaktora katalitycznego może zmniejszyć opory przepływu płynu przez tę strukturę oraz zintensyfikować transport ciepła i masy (nawet o 70% w relacji do struktury prostopadłościennej).

Przegląd literatury dokonany w pracy jest obszerny i wyczerpujący, 127 pozycji, a przejrzysty opis zjawisk związanych z mechanizmem transportu pędu, ciepła i masy w krótkokanałowych strukturach katalitycznych świadczy o dużej wiedzy Autorki z zakresu wykonywanej pracy.

W części eksperymentalnej wykonano badania oporów przepływu i współczynników wnikania ciepła a następnie symulacje CFD dla przepływu powietrza przez struktury opływowe o trzech różnych kształtach przekroju poprzecznego kanałów (kwadratowym, trójkątnym i sześciokątnym) dla różnej długości kanałów.

Opływowe struktury krótkokanałowe o sześciokątnym, kwadratowym i trójkątnym kształcie przekroju poprzecznego kanałów zostały wytworzone techniką selektywnego stapiania laserowego (SLM) na Politechnice Wrocławskiej. Do badań współczynników wnikania ciepła i oporów przepływu zbudowano aparaturę pomiarową zaopatrzoną w termopary (wlot-wylot), rotametr i system akwizycji danych.

W następnym kroku określono powierzchnię właściwą czyli powierzchnią dostępną dla osadzenia warstwy aktywnej katalitycznie, porowatość oraz wysokość wewnętrzną kanału wzdłuż długości struktury w celu określenia właściwości transportowych oraz do opisu matematycznego reaktora.

Zbadano także dokładność wydruku SLM badanych struktur metodą XTC. Na podstawie obrazów tomograficznych 2D wykonano rekonstrukcję 3D badanych struktur i wykazano, że różnica pomiędzy parametrami rzeczywistymi i testowymi (model CAD, wykorzystany dalej do obliczeń CFD) są niewielkie, ok 10%.

W pracy wykonano eksperymenty dotyczące określania oporów przepływu dla analizowanych kształtów przekroju poprzecznego kanałów. Wykazano, że spadki ciśnienia dla struktur trójkątnych są większe niż dla struktur sześciokątnych i kwadratowych i rosną ze wzrostem prędkości przepływu.

W rozprawie porównano wyznaczone doświadczalnie opory przepływu dla struktur opływowych z wartościami obliczonymi z korelacji literaturowych dla wypełnień monolitycznych oraz struktur krótkokanałowych o zbliżonych kształtach przekroju poprzecznego kanałów.

W kolejnych rozdziałach analizowano proces transportu ciepła w badanych strukturach opływowych; wartości liczby Nusselta porównano z obliczonymi na podstawie korelacji literaturowych dla wypełnień monolitycznych i krótkokanałowych wykazując przewagę zaproponowanych rozwiązań w stosunku do struktur klasycznych.

Ważnym etapem pracy była analiza CFD procesów transportu pędu i ciepła w strukturach opływowych i krótkokanałowych o kwadratowym kształcie przekroju poprzecznego kanałów. Analiza CFD hydrodynamiki przepływu w strukturze opływowej i krótkokanałowej wykazała obecność wirów we wlotowej i wylotowej części kanału.

Wyniki obliczeń CFD potwierdziły, że opływowa geometria redukuje zawirowania i strefy stagnacji we wlotowej części kanałów struktur krótkokanałowych co wpływa na obniżenie lokalnych wartości liczb Nusselta. Wykazano, także, iż, dla struktury opływowej, wiry wylotowe intensyfikują wymianę ciepła w tej części kanału co powoduje, że struktura opływowa charakteryzuje się wyższymi średnimi wartościami liczb Nusselta i większymi oporami przepływu w porównaniu do struktury krótkokanałowej o geometrii klasycznej.

Należy podkreślić, iż wszelkie przeprowadzone w pracy badania i analizy wykonano starannie i zgodnie z zasadami sztuki. W badaniach zastosowano nowoczesne techniki pomiarowe i obliczeniowe i wysokiej klasy sprzęt pomiarowy.

Praca doktorska została wykonana w ramach projektu badawczego OPUS 11 nr 2016/21/B/ST8/00496 pt. "Strukturalne opływowe reaktory katalityczne z wypełnieniami drukowanymi w systemie 3D" finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki i częściowo opublikowana w trzech czasopismach, w tym w *Chemical Engineering Journal* oraz zaprezentowana na trzech konferencjach krajowych.

Duże wrażenie robi ogólny dorobek publikacyjny Doktorantki; 20 publikacji w czasopismach naukowych oraz 14 wystąpień konferencyjnych w latach 2017-2023.

Nie mam żadnych poważniejszych zastrzeżeń do przedstawionej pracy, jednakże po uważnej analizie części eksperymentalnej i teoretycznej rozprawy chciałbym postawić kilka pytań, na które nie znalazłem odpowiedzi w recenzowanej rozprawie.

- Rozpocznę od tytułu rozprawy: „Transport pędu i ciepła w wypełnieniach reaktorów strukturalnych wykonywanych metodami addytywnymi”. Tytuł sugeruje, iż nacisk w pracy będzie położony na metody wytwarzania krótkokanałowych reaktorów strukturalnych podczas gdy praca dotyczy badań zjawisk przepływowych i transportowych w nowej generacji wypełnień strukturalnych; strukturach opływowych. Tytuł rozprawy, np. „Transport pędu i ciepła w wypełnieniach reaktorów strukturalnych o opływowych

ściankach” lepiej oddawałby cel i zakres pracy. Uwaga to, oczywiście, nie umniejsza, wartości samej pracy.

- Zaobserwowałem znaczne różnice pomiędzy danymi literaturowymi a własnymi badaniami np. spadku ciśnienia dla struktur o tej samej długości kanału, np. rys. 21; czy jest to tylko wpływ wyoblenia geometrii? jeśli tak to bardzo znaczny.
- Jakość obliczeń CFD zależy, między innymi od parametrów siatki numerycznej; generując siatkę obliczeniową kontroluje się jej jakość przy pomocy takich parametrów jak: prostopadłość siatki, skośność, współczynnik kształtu; jakie były parametry zastosowanej do obliczeń siatki numerycznej? Nie znalazłem również informacji nt. warunków zakończenia obliczeń CFD, jaki był warunek zbieżności obliczeń?
- Nie do końca jest dla mnie jasna liczba elementów siatek obliczeniowych zawartych w Tabeli 22. Najwięcej elementów zastosowano dla struktury SKw6, a najmniej dla SKw12 czyli najdłuższej, powinno być odwrotnie: im dłuższa struktura tym więcej elementów?
- Wyniki modelu CFD weryfikowano w pracy porównując parametry teoretyczne i eksperymentalne na wlocie i wylocie z badanych struktur. Porównanie zamieszczone np. w Tabeli 24 pokazuje dobrą zgodność. Jednakże, zgodność wlot-wylot świadczy tylko o poprawnym sformułowaniu bilansów ciepła i masy i nie musi się przełożyć na lokalny obraz przepływu wewnątrz badanej struktury.
- Przy wyznaczaniu współczynników wnikania ciepła, wartość średniej logarytmicznej różnicy temperatur pomiędzy powierzchnią struktury a przepływającym powietrzem wynosiła 10°C, następnie różnicę tę zwiększono do 20°C. Dlaczego przyjęto takie właśnie wartości do obliczenia transportu ciepła?

W pracy znalazłem drobne niezręczności językowe, wskażę tylko na jedno, słowo „nieco” jest nadużywane; np. „Wartości liczb Nusselta dla testowanych struktur o sześciokątnym i kwadratowym przekroju kanału są nieco większe w porównaniu do...”, „Struktury opływowe o trójkątnym kształcie przekroju poprzecznego kanałów charakteryzują się nieco mniejszymi wartościami liczb Nusselta...”; tylko we Wnioskach (str. 82-84) występuje 6 razy. W pracy doktorskiej jest to zbyt mało precyzyjne określenie relacji pomiędzy badanymi zjawiskami. Nie zmienia to faktu, iż rozprawa napisana jest dobrym językiem.

Opracowanie edytorskie i forma graficzna pracy bardzo dobra.

Powyższe uwagi mają charakter polemiczny i nie umniejszają wartości pracy.

WNIOSEK

Rozprawa doktorska mgr inż. Katarzyny Sindery stanowi samodzielne rozwiązanie problemu badawczego z dziedziny inżynierii chemicznej w obszarze katalitycznego oczyszczania gazów dla nowej generacji krótkokanałowych katalizatorów monolitycznych.. W pracy zrealizowano założony cel; wykazano możliwość i celowość zastosowania struktur opływowych jako wypełnień krótkokanałowych reaktorów katalitycznych. Zebrano cenne dane kinetyczne opisujące wartości liczb Nusselta oraz współczynniki oporu Fanninga dla krótkokanałowych struktur opływowych. Rozprawa wnosi istotne elementy nowości w obszarze identyfikacji mechanizmów transportu pędu i ciepła w krótkokanałowych reaktorach katalitycznych i wyjaśnia wiele zjawisk zachodzących podczas przepływu przez struktury opływowe.

Uważam, że praca mgr inż. Katarzyny Sindery odpowiada wymaganiom stawianym pracom doktorskim określonym w artykule ustawy Prawo o Szkolnictwie Wyższym z dn. 14.03.2003 r. (z późn. zm.) i stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.



Profesor Ireneusz Zbiciński