

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Katarzyny Sindery  
„Transport pędu i ciepła w wypełnieniach reaktorów strukturalnych wykonywanych  
metodami addytywnymi”**

Pismem z dnia 8 kwietnia 2024 r. powierzono mi zrecenzowanie rozprawy doktorskiej mgr inż. Katarzyny Sindery, pt. „Transport pędu i ciepła w wypełnieniach reaktorów strukturalnych wykonywanych metodami addytywnymi”. Praca doktorska została przygotowana w Instytucie Inżynierii Chemicznej Polskiej Akademii Nauk, pod kierunkiem dr hab. inż. Anny Gancarczyk. Promotorem pomocniczym jest dr inż. Marzena Iwaniszyn.

Praca składa się z 102 stron. Podzielona została na 6 rozdziałów w tym „Cel i zakres pracy” oraz „Podsumowanie i wnioski”. Ponadto praca zawiera streszczenie, wstęp, spis symboli, bibliografię oraz aneks zawierający procedurę obliczeniową współczynników wnikania ciepła dla struktur opływowych. Układ rozdziałów nie budzi moich zastrzeżeń.

Spis literatury zawiera 127 pozycje. Zdecydowana większość pozycji to prace, które ukazały się w ostatniej dekadzie. Dobór literatury wskazuje na dobrą orientację w zakresie problematyki badawczej.

### **Problematyka rozprawy**

Praca rozpoczyna się dwustronicowym wstępem, w którym Doktorantka wyjaśnia potrzebę zajmowania się tematyką katalitycznych reaktorów strukturalnych.

Pierwszy rozdział, zawierający aktualny stan wiedzy, jest podzielony na cztery podrozdziały. Pierwszy kontynuuje tematykę katalitycznych reaktorów strukturalnych, skupiając się na nośnikach fazy katalitycznej oraz zastosowaniu tego typu reaktorów. W drugim podrozdziale opisano struktury krótkokanałowe jako wypełnienia monolityczne

o zintensyfikowanych właściwościach transportowych. Opierając się na pracy Shaha i Londona doktorantka dokładnie wyjaśnia korzyści wynikające z skrócenia długości kanału monolitu. Zespół, w którym pracuje Pani mgr inż. Katarzyna Sintera już od ponad dekady zajmuje się różnymi konstrukcjami wypełnień monolitycznych o krótkich kanałach, w których występuje rozwijający się przepływ laminarny. Kontynuując tę ideę, proponuje w trzecim podrozdziale, następną modyfikację geometrii wypełnień monolitycznych czyli ukształtowanie ścianek krótkokanałowej struktury na podobieństwo skrzydła samolotu, co według Doktorantki, powinno zmniejszyć opory przepływu płynu przez strukturę oraz zintensyfikować transport ciepła i masy. Żeby udowodnić, że opływowy kształt korzystnie wpływa na właściwości przepływowe takiej geometrii wypełnienia, Doktorantka przeprowadziła wstępną analizę za pomocą analizy numerycznej CFD, opisując jej przebieg w czwartym podrozdziale. Z analizy tej wynika, że opływowy kształt korzystnie wpływa na właściwości przepływowe geometrii opływowej, zmniejszając intensywność zawirowań płynu. Zdaniem recenzenta, przegląd literatury właściwie oddaje stan wiedzy w rozpatrywanej tematyce i pokazuje celowość prowadzenia takich badań.

Jednostronicowy, drugi rozdział, zawiera cel i zakres pracy. Jako cel pracy Doktorantka postawiła sobie zbadanie doświadczalnie oraz numerycznie za pomocą oprogramowania CFD oporów przepływu oraz współczynników wnikania ciepła dla krótkokanałowych wypełnień strukturalnych, których ścianki kanałów ukształtowano na podobieństwo skrzydeł samolotu.

Następny trzeci rozdział opisuje metodykę badań. W pierwszym podrozdziale opisano metody wytworzenia nowych testowanych struktur krótkokanałowych oraz ich parametry geometryczne. W drugim Doktorantka przedstawiła opis stanowiska doświadczalnego oraz metody pomiarowe.

W czwartym rozdziale Doktorantka przedstawia wyniki Swoich doświadczeń oraz wnioski z nich wynikające. Rozpoczyna (pierwszy podrozdział) od charakterystyki struktur uzyskanych w oparciu o geometrię CAD oraz w oparciu o metodę tomografii komputerowej. Porównuje parametry tych struktur (porowatość, powierzchnię właściwą oraz średnią wysokość kanałów) uzyskanych tymi metodami. Drugi podrozdział zawiera wyniki badań oporów przepływu, porównanie tych wyników z istniejącymi korelacjami w literaturze, jak również propozycję własnych korelacji. Podobnie jest opracowany trzeci podrozdział, dotyczący badań transportu ciepła.

Piąty rozdział poświęcony jest symulacjom CFD przeprowadzonych za pomocą oprogramowania ANSYS. Tego typu symulacje umożliwiają głębszą analizę zjawisk przepływowych, pozwalających porównać układ linii prądów.

Pracę zakończono rozdziałem szóstym w którym Doktorantka przedstawiła podsumowanie dysertacji oraz zawarła wnioski, przedstawione w jedenastu punktach

### Ocena formalnej strony dysertacji

Przedłożona rozprawa napisana jest poprawną polszczyzną, w sposób przejrzysty i spójny. Tekst rozprawy i przedstawione w nim rozważania tworzą logiczną całość. Opracowanie i analiza otrzymanych wyników nie budzą zastrzeżeń.

Praca spełnia wszystkie wymogi formalne. Pod względem językowym i edycyjnym praca jest poprawna. Zauważono nieliczne błędy stylistyczne, interpunkcyjne, błędą pisownię wyrazów. Poniżej przedstawiono niektóre z nich:

1. Strona 16, Tab. 1 – jest „przeroju”, powinno być „przekroju”.
2. Strona 33, linia 14 – jest „odpowiednio Rys. 21B i Rys. 21C”, powinno być „odpowiednio Rys. 21C i Rys. 21B”.
3. Strona 43, linia 6 – jest „oposane”, powinno być „opisane”.
4. Strona 51, linia 21 – jest „pomięto”, powinno być „pominięto”.
5. Strona 54, linia 6 – jest „np”, powinno być „np.”.
6. Strona 64, wykres 34A – jest „ $(f \cdot Re_d)_{fd}=4,002$ ”, powinno być „ $(f \cdot Re_d)_{fd}=3,608$ ”.
7. Strona 69, linia 7 – jest „ $1500 \text{ W} \cdot \text{m}^2$ ”, powinno być „ $1500 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ”.
8. Strona 78, wykres 45, oś x – jest „ $\text{mm}^3$ ”, powinno być „ $\text{m}^3$ ”.
9. Strona 87, linia 8 – jest „experymetalna”, powinno być „eksperymentalna”.

### Wartość merytoryczna pracy

Przyjęty cel rozprawy został w pełni zrealizowany. Opisane w pracy osiągnięcia wnoszą cenny wkład do zasobu wiedzy na temat krótkokanałowych wypełnień strukturalnych.

Najważniejszym osiągnięciem Doktorantki jest zaproponowanie i wykonanie modyfikacji nowej generacji krótkokanałowych wypełnień strukturalnych, mogących mieć zastosowanie w reaktorach katalitycznych, polegającej na ukształtowaniu ścianek kanałów na podobieństwo skrzydła samolotu. Doktorantka założyła, że taka geometria powinna znacząco

zintensyfikować transport ciepła i masy w porównaniu do tradycyjnych monolitów i struktur krótkokanałowych, równocześnie opory przepływu powinny być nieco większe niż dla monolitów i podobne do wartości właściwych dla struktur krótkokanałowych. Tę hipotezę sprawdzono przeprowadzając badania doświadczalne oporów przepływu i współczynników wnikania ciepła jak również za pomocą symulacji numerycznych z zastosowaniem komputerowej dynamiki płynów (CFD). Doktorantka nie prowadziła badań dla transportu masy.

Poniżej przedstawiam wybrane uwagi i pytania, które nasunęły mi się podczas czytania pracy:

1. Temat pracy doktorskiej dotyczy wypełnień strukturalnych wykonanymi metodami addytywnymi. Nigdzie w Swojej pracy Doktorantka nie wyjaśniła na czym polegają te metody.
2. Na stronie 14, Autorka napisała: "Korzystne właściwości tego rodzaju nośników zostały potwierdzone w wielu pracach [59-67]." Zacytowane artykuły, są autorstwa zespołu, do którego należy Doktorantka. Czy dostępne są jakieś inne prace, spoza Zespołu katalitycznych reaktorów strukturalnych IICCh PAN, potwierdzające te korzystne właściwości.
3. Na tej samej stronie 14, wnioski wynikające z wyników pokazanych na rysunku 3 i 4 wyglądają tak jakby były przedstawione pod hipotezę, która ma wyjaśnić zasadność podjętych badań. Doktorantka stwierdziła, że dla wszystkich długości struktur krótkokanałowych współczynniki oporu Fanninga są nieco większe w porównaniu do złoża monolitycznego. Z rysunku 4 wynika, że dla wartości  $Re=2000$  ta różnica jest ok. dziesięciokrotna. Czy przy tak dużej różnicy zasadne jest stosowanie zwrotu "nieco większe"? Dla tej samej liczby Reynoldsa, wnioski wynikające z wyników pokazanych na rysunku 3 są już inaczej przedstawione. Mocno zaakcentowano, że wartości liczb Nusselta są ok. 5 -10 krotnie większe niż dla monolitu.
4. Dlaczego zastosowanie prędkości rzeczywistej jest dla Doktorantki podejściem niestandardowym? Tylko w ten sposób można było realnie porównać uzyskane wyniki dla struktur o różnych porowatościach.
5. Strona 33 – skąd taka duża różnica w porowatościach dla struktur trójkątnych? Dla struktury opływowej porowatość jest o połowę mniejsza niż dla struktury krótkokanałowej z pracy [67]. Dla struktur sześciokątnych, dla obu konstrukcji,

- porowatości właściwie się nie różnią – 0,71 dla struktury opływowej, 0,73 dla struktury krótkokanałowej z pracy [65].
6. Na stronie 51, drugi dwuzdaniowy akapit dotyczący rysunku 29 jest dla mnie niezrozumiały. Proszę o wyjaśnienie tego tekstu. Co oznacza "niewielki wpływ"?
  7. Na tej samej stronie 51, Autorka napisała: "Dla nośników o kwadratowym i sześciokątnym przekroju poprzecznym kanałów wartości liczb Nusselta są zbliżone, natomiast dla struktur trójkątnych, są nieco mniejsze niż dla pozostałych struktur, niezależnie od długości nośnika.". Doktorantka powinna unikać nadużywania zwrotów „nieco mniejsze”. Lepiej by było podać wartości w procentach. Analizując wykresy na rysunku 30 można zauważyć, że powyżej  $Re=1000$ , nie ma żadnego wpływu kształtu przekroju poprzecznego kanału na wartości liczb Nusselta.
  8. Strona 57, Doktorantka twierdzi, że: „Warto zauważyć, że wartości liczb Nusselta dla struktur opływowych są nieco większe niż wyznaczone w oparciu o korelację zaproponowaną dla struktur krótkokanałowych [66], co wskazuje na intensywniejszy transport ciepła dla opracowanych struktur.". Wniosek według mnie na wyrost. Z tabeli 17 wynika, że korelacja zaproponowana przez Iwaniszyn i wsp. [66] została opracowana dla struktur o długości  $L=1, 2$  oraz  $4\text{mm}$ . Dlatego też dla struktury SHex3 o długości  $L=3\text{mm}$ , eksperymentalne wartości liczb Nusselta są zbliżone do tych policzonych z korelacji z pracy [66] (rysunek 32A). Im większa długość struktur tym większe różnice pomiędzy wartościami liczb Nusselta z eksperymentu a tymi obliczonymi z korelacji (Rys. 32B i 32 C). Proszę o komentarz.
  9. Na jakiej podstawie przyjęto do obliczeń CFD stałą wartość strumienia ciepła na ściankach kanału  $1500\text{ W/m}^2$ ? Przypuszczam, że Doktorantce chodziło o gęstość strumienia ciepła a nie strumień ciepła. Czy przeprowadzono też obliczenia dla innych wartości tego parametru?
  10. W dodatku 1, na stronie 101 i 102, w spisie symboli brakuje jednostek.
  11. Doktorantka w pracy nadużywa wyrażen, które pasują bardziej do analizy jakościowej niż analizy ilościowej. W opisie badań wyraz "nieco" pojawia się 14 razy, (w tym w Podsumowaniu aż 6 razy), a wyraz „niewielki” – 9 razy. Przez taki opis wyników badań można mieć wrażenie, że korzyści wynikających z zastosowania badanych przez Doktorantkę struktur są „niewielkie”, co oznacza właściwie, że nie ma żadnych korzyści.

Uważam, że zaprezentowany problem badawczy ma duże znaczenie zarówno w wymiarze poznawczym jak i aplikacyjnym. Na pewno obszar badań związany z strukturalnymi wypełnieniami wymaga jeszcze dalszych badań. Przedstawione uwagi i zastrzeżenia nie obniżają istotnie wartości merytorycznej rozprawy.

### **Wniosek końcowy**

Podsumowując, praca doktorska mgr inż. Katarzyny Sindery spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim, stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego o istotnej nowości naukowej, jak również wykazuje ogólną wiedzę Doktorantki i umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania Ustawy z dnia 20 lipca 2018r . Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tj. Dz. U.2018 poz. 1668 z późn. zm.). Mając na uwadze osiągnięte wyniki i obowiązujące przepisy prawa wnoszę do Rady Naukowej Instytutu Inżynierii Chemicznej Polskiej Akademii Nauk o dopuszczenie Pani mgr inż. Katarzyny Sindery do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Opole, 09.06.2024 r.

