

dr hab. inż. Robert Grzywacz

Kraków 03.01.2020

Katedra Inżynierii Chemicznej i Procesowej  
Wydział Inżynierii i Technologii Chemicznej  
Politechnika Krakowska  
ul. Warszawska 24  
31-155 Kraków

## RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Marcina Piątka

„Opis morfologii oraz wyznaczenie współczynników transportu pędu, ciepła i masy dla pian stałych”

Promotor pracy: dr hab. inż. Andrzej Kołodziej

Promotor pomocniczy: dr inż. Anna Gancarczyk

Recenzowana rozprawa doktorska została wykonana w Instytucie Inżynierii Chemicznej Polskiej Akademii Nauk w Gliwicach. Jej przedmiotem jest opis morfologii i wyznaczenie współczynników transportu pędu, ciepła i masy dla pian stałych.

Od 1926 roku, kiedy to po raz pierwszy opatentowano metoda spieniania metalu lekkiego, do dnia dzisiejszego pojawiło się wiele publikacji opisujących metody wytwarzania i aplikację stałych pian metalicznych. Przykładem przeglądowej publikacji jest artykuł Francisco García-Moreno, *Commercial Applications of Metal Foams: Their Properties and Production* z 2016 roku (doi: 10.3390/ma9020085). Analizując zamieszczone w niej materiały źródłowe można zauważyć dynamiczny wzrost zainteresowania Ośrodków Badawczych problemem wytwarzania i aplikacji pian metalicznych. Innym zagadnieniem poruszonym w tej publikacji jest przyrost badań dotyczących analizy właściwości takich materiałów. Wzrost ten można zauważyć zwłaszcza po 2000 roku. Jak zauważono, szczególnie ważne jest uzależnienie właściwości pian od jej morfologii. Należy zatem stwierdzić, iż podjęty przez Doktoranta przedmiot badań jak najbardziej wpisuje się w aktualne trendy związane z badaniem pian metalicznych i w mojej opinii jest w pełni uzasadniony.

Jako cel pracy Doktorant postawił sobie doświadczalne wyznaczenie parametrów morfologicznych, oporów przepływu i współczynników transportu ciepła dla wybranych pian stałych w celu powiązania parametrów przepływowych i transportowych z ich parametrami morfologicznymi. Badania przeprowadzone były dla jednofazowego przepływu gazu przez złożę jednego z trzech rodzajów pian metalicznych (alumiowej, chromoniklowej i niklowej) o otwartej strukturze komórek.

Sformułowane zostały również tezy badawcze zakładające, iż: właściwości przepływowe i transportowe pian stałych są zdeterminowane przez ich morfologię oraz że w złożonej strukturze piany stałej występują zjawiska zarówno rozwijającego się przepływu laminarnego przez krótką kapilarę, jak i opływu ciała stałego.

Przedstawiona do recenzji praca została napisana w języku polskim, liczy 127 stron i składa się z siedmiu rozdziałów. W spisie literatury Autor zawarł 159 pozycji z których jedna trzecia została opublikowana w ostatnich 10 latach. W rozprawie zawarto informacje o finansowaniu badań z projektu badawczego OPUS 2 nr 2011/03/B/ST8/05455 pt. „Piany stałe jako efektywny nośnik katalizatora – badania podstawowe transportu pędu, ciepła i masy” fundowanego przez Narodowe Centrum Nauki. Zaznaczono, iż wyniki tych badań zostały zamieszczone w 13 publikacjach oraz przedstawione na 9 konferencjach naukowych. Praca zakończona jest spisem oznaczeń i zbiorem 7 załączników.

W rozdziałach 1 i 2 Autor zamieścił wstęp opisujący metody otrzymywania, właściwości i zastosowanie pian stałych ze szczególnym uwzględnieniem pian metalicznych. Sformułował również cel i zakres pracy oraz postawił tezy badawcze. Zamieszczony przez Autora wstęp zawiera istotne informacje wprowadzające czytelnika w podjętą tematykę badawczą. Szczególnie cenne jest zestawienie zastosowań ceramicznych pian stałych w wybranych, przemysłowych procesach chemicznych, zamieszczone w Tabeli 1.

Rozdział 3 dotyczy problematyki morfologii pian stałych. Autor zamieścił tam opis parametrów morfologicznych, metody ich wyznaczania oraz metody, które zastosował w swojej pracy badawczej. W rozdziale tym zostały zawarte również wyniki przeprowadzonych badań morfologicznych oraz ich dyskusja. Ostatnią częścią tego rozdziału jest opis i analiza dostępnych w materiałach źródłowych modeli pian stałych. Zastosowane przez autora metody badawcze umożliwiły określenie morfologii analizowanych trzech metalicznych pian stałych. W tym celu, poza klasycznymi metodami szeroko zastosowano analizę obrazów. Na podstawie przeprowadzonych badań wybrano jeden z opisanych w rozdziale modeli do opisu morfologii badanych pian.

Rozdział 4 zawiera badania związane z wyznaczeniem oporów przepływu płynu przez warstwę piany metalicznej. Autor zamieścił tam aktualny stan wiedzy tym temacie, przedstawił zastosowane przez siebie metody badawcze oraz opisał uzyskane wyniki badań. Na zakończenie rozdziału przedstawił krytyczną analizę mechanizmów przepływu płynów przez piany stałe. Analizie poddano takie mechanizmy przepływu płynu jak przepływ przez krótką kapilarę oraz opływ ciała stałego. Jak autor sam stwierdził, dopasowanie zaproponowanych modeli daje podobne rezultaty, zatem konieczne są dalsze badania związane z analizą ruchu ciepła. Rozdział ten ma duże znaczenie dla całości pracy. Zamieszczone w nim wyniki badań doświadczalnych, wykonane obliczenia oraz ich zestawienia w postaci wykresów, udowadniają pierwszą tezę recenzowanego doktoratu – **morfologia pian stałych ma istotny wpływ na ich charakterystyki hydrodynamiczne.**

W rozdziale 5 opisane zostały badania związane z wyznaczeniem współczynników transportu ciepła i masy przez piany stałe. Struktura tego rozdziału jest podobna jak w poprzednich, a zatem przedstawiono aktualny stan wiedzy, stosowane metody badawcze oraz uzyskane wyniki badań. Na wstępie autor zamieszcza zbiór kilkunastu korelacji literaturowych umożliwiających wyznaczenie współczynników transportu ciepła i transportu masy. Wyniki obliczeń wykonane z zastosowaniem tych korelacji, zamieszczone na wykresie 5.1, potwierdzają ich znaczną rozbieżność. Rozbieżność ta wynika z przyjętej przez autorów tych korelacji metodyki badawczej oraz z zastosowaniem przez nich różnych charakterystycznych wymiarów liniowych co dobrze odzwierciedla tabela 13 i 14. W celu rozwiązania tej rozbieżności, Autor proponuje własne badania doświadczalne i na ich podstawie dokonuje wyboru korelacji. Należy zaznaczyć, iż doświadczalnie badano jedynie transport ciepła. Współczynniki transportu masy wyznaczono z wykorzystaniem analogii Chiltona – Colburna. Przeprowadzone badania i ich wyniki zamieszczone w tym rozdziale, potwierdzają tezę, iż **morfologia pian stałych ma istotny wpływ na charakterystyki transportowe** przy czym w mojej opinii zostało to udowodnione dla transportu ciepła co zresztą Autor pisze na zakończenie tego rozdziału.

W rozdziale 6 opisano badania związane z wyznaczeniem mechanizmów przepływu płynu przez badane piany metaliczne na podstawie analogii transportu pędu, ciepła i masy. Rozdział ten w przeciwieństwie do poprzednich ma charakter obliczeniowy. Do wykonania obliczeń przyjęto uogólnioną analogię Leveque'a. Równanie to zostało zastosowane do rozwiązania problemu zarysowanego w rozdziale 4 recenzowanej pracy a mianowicie wyboru mechanizmu przepływu płynu przez pianę stałą. Analizując uzyskane wyniki Autor stwierdził, iż **prawidłowym modelem jest rozwijający się hydrodynamicznie przepływ laminarny przez krótką kapilarę** co stanowi ono rozwiązanie i uściślenie ostatniej tezy stawianej przez doktoranta. Zaproponowany na podstawie badań model przepływu stanowi ważne osiągnięcie Doktoranta gdyż jest pierwszym doniesieniem literaturowym w tym temacie. Kolejnym osiągnięciem Autora, jest potwierdzona uzyskanymi wynikami, propozycja stosowania jako wymiaru liniowego dla modelowego kanału kapilarnego średnicy mostka piany.

Całość przeprowadzonych badań zakończono rozdziałem 7 stanowiącym podsumowanie i zawierającym wnioski będące syntetycznym zestawieniem wniosków pojawiających się systematycznie w każdym z omawianych wyżej rozdziałów.

Praca przedstawiona do recenzji napisana jest w sposób przejrzysty i logiczny. Recenzent nie ma praktycznie szans sprawdzenia poprawności wyników doświadczalnych czy też obliczeniowych, jednak lektura pracy, reprezentowany przez Doktoranta warsztat naukowy i sposób interpretacji wyników z dużym prawdopodobieństwem pozwala przyjąć iż, są one w absolutnym porządku.

Lektura pracy nasunęła mi jednak, jako jej recenzentowi, szereg uwag i wątpliwości które przedstawię poniżej.

1) str.13 rys.1.6 – brak źródła zamieszczonego wykresu, nie wiadomo co oznaczają zamieszczone na wykresie trójkąty.

2) str.14 – autor pisze iż: „*modelowanie przeprowadzone dla reakcji pierwszego rzędu potwierdza, że piany stale stanowią pośrednie rozwiązanie pomiędzy złożem monolitycznym a usypanym*” po czym odwołuje się do rys.1.7 na którym przedstawione są wyniki symulacji dla kinetyki wg pracy [51]. Rodzi się pytanie. Czy to są obliczenia Doktoranta? Jaki był model matematyczny? Jaki był cel zamieszczenia tej informacji jeżeli praca nie dotyczy badań reaktorów.

3) str.17 - dla wygody czytelnika brakuje jasnego przyporządkowania nazwy pian, ich numerów i oznaczeń literowych stosowanych przez Autora. Być może metalurg wie od razy po numerze piany co to za piana ja niestety nie wiem.

4) str.19 i dalej w każdym wystąpieniu – Autor pisze, iż  $S_v$  z angielskiego *specific surface area* o wymiarze  $m^2/m^3$  - rozumiem, że to powierzchnia piany w  $1 m^3$  piany - to powierzchnia geometryczna. W mojej opinii prawidłowy termin to raczej powierzchnia właściwa lub jednostkowa. Powierzchnia geometryczna powinna mieć wymiar  $m^2$ . Proszę o podanie źródła takiego tłumaczenia tego terminu.

5) str.20 – niekonsekwencja oznaczeń, w spisie oznaczeń i we wzorze w nawiasie jest  $\epsilon_t$  w opisie w treści pracy porowatość całkowita  $\epsilon_c$

6) str.20 – Autor pisze „*Parametry morfologiczne są niezbędne do wyznaczenia bezwymiarowych liczb kryterialnych (np. liczb Reynoldsa, Nusselta, Sherwooda) stosowanych w modelach matematycznych reaktora.*”. W mojej opinii w modelach matematycznych tych akurat liczb kryterialny nie stosujemy. Stosowane są np. liczby Pe czy też Da. Z zastosowaniem wymienionych wyżej liczb możemy obliczyć pewne parametry stosowane w modelach matematycznych. Przy okazji pytanie: jakiego reaktora?

7) str.23 – jako jedną z metod badawczych Autor podaje metodę rezonansu magnetycznego po czym pisze, że wyniki za jej pomocą uzyskane są niedokładne i trzeba je sprawdzić inną metodą. Rodzi się pytanie po co stosować rezonans.

8) str.26 – w jaki sposób Autor zaznaczał elementy szkieletu piany w programie AutoCAD, ręcznie czy za pomocą jakiegoś automatycznego skryptu. Jeżeli ręcznie to to była iście benedyktyńska praca i nie trudno o popełnienie błędu. Czy było to jakoś sprawdzane?

9) str.28 – w statystyce znane są metody sprawdzenia poziomu dopasowania rozkładów statystycznych np. metoda momentów. Czy doktorant stosował jakieś metody takiego sprawdzania?

10) str. 30 – zamieszczone zdjęcia (rys.3.9 i 3.10), z opisu wynika, że wykonane dla badanych pian, są przez swoją wielkość bardzo nieczytelne. Wierze na słowo, że w szkielecie są pory. Autor pisze także, iż: „*Analizując dokładnie ich liczbę na białych obszarach (A) i (B) daje się zauważyć, że minimalnie częściej pojawiają się ...*” itd. Nasuwa się pytanie jak to liczono.

11) str. 39 – wzór 10. Z opisu wynika, że Autor go wyprowadzał. Mnie się nie udało. Czy Autor mógłby takie wyprowadzenie przedstawić?

12) str.42 – analizując rys.3.18 nasunęło mi się pytanie czy gdy mostek ma prawy skrajny kształt a nawet kształt trójkątny to czy okno ma objętość, czy w ogóle jest sens o nim mówić jako o osobnej

przeźrzeni w pianie. Widać to wyraźnie na rys 3.20. Uwzględnienie okien w takim przypadku chyba zawyża objętość wewnętrzną piany.

13) str.44 – tabela 7 i strona 45. W treści akapitu na tej stronie Autor pisze, że rozbieżności w dokładności stosowanych modeli są podobne po czym wybiera model Richardsona. W tabeli 7 ten model ma wstawioną bardzo dużą wartość błędu – 179%. Proszę o komentarz.

14) str.52 – w opisie stanowiska Autor napisał że zawierało ono termopary a w opisie doświadczenia i opracowaniu uzyskanych wyników nic nie ma o pomiarach temperatury. Jaki był cel umieszczenia termopar.

15) str.74 – na wykresie rys.5.1 rzędna opisana jest jako dwa moduły bezwymiarowe oddzielone przecinkiem natomiast w treści akapitów na tej stronie moduły te są podane jako ich iloczyn. Proszę o komentarz.

16) str.76 – wzór (87) w mojej opinii jest nieprawidłowy. Myślę, że to błąd edycyjny ale proszę o komentarz. Dodatkowo jest w nim powierzchnia  $S_v$  o wymiarze wg spisu oznaczeń  $m^2/m^3$  wtedy współczynnik wnikania nie będzie miał wymiaru jak w/w spisie. Ta sama uwaga dotyczy ciepła  $Q_{eff}$ . Czy tu nie powinna być jednostka J/s a nie J jak podano w spisie?

17) str.76 – czy podjęto próbę zastosowania do obliczeń innej analogi ruchu ciepła i masy. Proszę o komentarz. Dodatkowo pisanie, że współczynniki wnikania masy wyznaczono doświadczalnie to jednak drobne nadużycie.

18) Czy mając tak dokładny model 3D piany, jak to przedstawiono na rysunkach (np. rys.4.11), uzyskany zapewne za pomocą tomografii komputerowej, nie można było się pokusić na wyznaczenie współczynników oporu metodami CFD?

Powyższe uwagi nie umniejszają ogólnej wartości merytorycznej pracy, dyskusja wyników jest poprawna i wystarczająco obszerna. W treści pracy Autor nie ustrzegł się błędów stylistycznych i lapsusów słownych jednak nie wpływają one na jej ogólny odbiór. W mojej opinii Autor rozprawy wykazał niezbędną ogólną wiedzę teoretyczną i umiejętność jej wykorzystania w samodzielnym rozwiązywaniu postawionego przed nim zagadnienia naukowego.

W związku z tym wnoszę o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Piątka do publicznej obrony, ponieważ moim zdaniem praca ta spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim wynikające z Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 (Dz.U. z 2003 r. Nr.65. poz. 595 wraz z późniejszymi zmianami).



dr hab. inż. Robert Grzywacz