Kraków 29.01.2025

Dr hab. inż. Krzysztof Kołodziejczyk, prof. AGH

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
Akademia Górniczo-Hutnicza
im. Stanisława Staszica w Krakowie
Al. A. Mickiewicza 30
30-059 Kraków

e-mail: krkolodz@agh.edu.pl

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
OPTYMALIZACJA UKŁADÓW REGULACJI PRZEPŁYWU FILTRACYJNEGO
W ZBIORNIKACH ŻYWIC WYMIANY JONOWEJ

autor rozprawy: mgr inż. Maciej Jerzy Kobielski

1. Podstawa formalna opracowania recenzji

Podstawą opracowania recenzji jest uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej z dnia 23 października 2024 r. w sprawie powołania recenzentów rozprawy doktorskiej mgra inż. Macieja Kobielskiego oraz pismo dr hab. inż., prof. PŚ Alicji Piaseckiej-Belkhayat, Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej, z dnia 23 października 2024 r. dotyczące wykonania recenzji przedmiotowej rozprawy.

Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Wojciech Skarka, prof. PŚ.

2. Wprowadzenie

Recenzowana praca została zrealizowana w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

Podjęta w pracy tematyka dotyczy układu przygotowania wody do procesu mycia w zmywarkach domowych. Podjęty temat posiada duże

Biuro Dziekana
wpłynęło dnia 31.01.2025
nr ..... zał. .....

znaczenie m.in. ze względu na skalę wykorzystania sprzętu AGD w których jest wykorzystywany. Już niewielka poprawa efektywności procesu przygotowania wody, a poprzez to zmniejszenie jej zużycia i jednoczesne wydłużenie żywotności układów wymiany jonowej, będzie przynosiło wymierne korzyści zarówno ekonomiczne jak i środowiskowe. Podjęta tematyka wpisuje się również w ideę zrównoważonego rozwoju, poprzez optymalizację wykorzystania surowca żywicy jonowymiennej, podniesienie sprawności układu, powoduje zmniejszenie wykorzystania zasobów naturalnych (zmniejszenie zużycia wody, zmniejszenie zużycia żywic jonowymiennych), zachowując pierwotną funkcjonalność układu.

Celem postawionym w rozprawie było zwiększenie efektywności wykorzystania żywicy wymiany jonowej przez opracowanie metody projektowania i optymalizacji w funkcji jednorodności wykorzystania pojemności jonowej dla rozwiązania technicznego pasywnego sterowania gradientami ciśnienia w zbiornikach wymiany jonowej przeznaczonych dla zmywarek użytku domowego, zastrzeżonego patentami pod numerami: PCT/CN2020/083801, WO 2021/203313 oraz EP 3962867 A0.

W pracy zostały również sformułowane dwie tezy:

Teza 1: *„Innowacyjna metoda projektowania zbiornika wymiany jonowej umożliwia maksymalizację wykorzystania surowca wykorzystywanego w wymiennikach jonowych”.*

oraz

Teza 2: *„Zmiana geometrii zbiornika wymiany jonowej, a w szczególności zmiana geometrii otworu dławienia kanału regulacji ciśnienia prowadzi do zmiany homogenizacji prędkości przepływu wewnątrz zbiornika wymiany jonowej, a tym samym umożliwia maksymalizację wykorzystania surowca wykorzystywanego w wymiennikach jonowych”.*

Podjęta tematyka z całą pewnością jest aktualna i praktycznie użyteczna, o czym świadczy realizacja badań Autora pracy w bezpośredniej

współpracy z producentem przedmiotowego urządzenia. Dodatkowym elementem potwierdzającym znaczenie jest ochrona patentowa urządzenia, którego optymalizację konstrukcji opracowywał Autor rozprawy.

3. Charakterystyka rozprawy

Przedłożona do recenzji rozprawa napisana jest w j. polskim i obejmuje 122 strony. Praca składa się 9 rozdziałów w tym z 3 rozdziałów zawierających zestawienia rysunków, tabel oraz literaturę. Wykaz literatury zawiera 104 pozycje w tym 1 pozycja – patent którego autorem jest Doktorant, 2 pozycje w których współautorem jest Doktorant. Praca zawiera 90 rysunków i wykresów oraz 8 tabel.

Rozdział pierwszy zawiera wprowadzenie oraz uzasadnienie wyboru tematu rozprawy. Autor doprecyzowuje przeznaczenie konstrukcji zbiornika wymiany jonowej zawężając obszar do rozwiązania przeznaczonego do użycia w zmywarkach gospodarstwa domowego. Rozwiązanie konstrukcyjne będące przedmiotem badań zostało zgłoszone do ochrony patentowej pod numerem PCT/CN2020/083801. W rozdziale tym został opisany problem badawczy, którego rozwiązania podjął się Autor pracy, jak również został przedstawiony zakres pracy.

W rozdziale drugim przedstawiony został cel pracy jak również zostały sformułowane wspomniane wcześniej dwie tezy.

Rozdział trzeci zawiera rozpoznanie aktualnego stanu wiedzy z zakresu pracy obejmujący zagadnienia związane z procesem projektowania zmywarek, łącznie z omówieniem układów oraz podzespołów zmywarek, zasadą ich działania jak również omówieniem różnych rozwiązań konstrukcyjnych zmywarek. Szczególnie uwaga została zwrócona na uwzględnienie kosztów w procesie projektowania, jak również kwestii praw autorskich. Osobny podrozdział został przeznaczony na omówienie procesu wymiany jonowej, jako elementu przygotowania wody do procesu zmywania, łącznie z omówieniem wpływu parametrów wody na skuteczność

procesu zmywania jak również trwałość urządzenia. W ramach przeglądu aktualnego stanu wiedzy Autor zamieszcza podstawowe informacje z zakresu mechaniki płynów w głównej mierze odnosząc się do klasyfikacji rodzaju przepływu oraz podstawowych równań stosowanych do opisu ruchu płynu tj. równanie ciągłości, równania zachowania pędu Naviera-Stokesa oraz równanie zachowania energii. Autor opisuje również zjawisko turbulencji, kawitacji oraz przepływ w ciałach porowatych. W ramach analizy literatury Autor zamieszcza również informacje na temat modelowania numerycznego przepływu płynu, wykonuje przegląd metod modelowania przepływu płynu.

Rozdział czwarty zatytułowany „Metodyka" zasadniczo zawiera opis zrealizowanych badań laboratoryjnych oraz wykonanych symulacji numerycznych. Rozdział ten podzielony jest na szereg podrozdziałów, które w swojej objętości zajmują prawie połowę pracy. Rozdział ten stanowi zasadniczą część pracy, w której przeprowadzona została optymalizacja opatentowanego rozwiązania. Na wstępie zdefiniowany został problem badawczy. Zdefiniowane zostały warunki brzegowe badania w tym ograniczenia technologiczne, ograniczenia kosztowe, jak również przedstawione zostały przyjęte założenia.

Na wstępie rozdziału Autor przedstawia szczegółową mapę badawczą opracowaną na podstawie Indywidualnego Planu Badawczego, wraz z krótkim opisem poszczególnych etapów realizowanych badań i symulacji.

Autor w pracy realizuje wstępne badania symulacyjne z wykorzystaniem modułu FlowSimulation z pakietu oprogramowania Solid Works. Dane do symulacji Autor uzyskuje na podstawie badania laboratoryjnego, w którym wyznacza charakterystykę oporów przepływu badanej komory. W pracy Autor weryfikuje wpływ natężenia przepływu wody na wydajność jonową preparatów, pod kątem doboru kryterium optymalizacji.

Kolejnym etapem przedstawionym w pracy jest wyznaczenie parametrów modelu numerycznego badanego filtra w oparciu o badania

laboratoryjne. Proces doboru parametrów modelu został podzielony na dwa etapy. W pierwszym etapie zostały wyznaczone parametry dla warstwy porowatej (warstwa jonitu), w drugim etapie wyznaczono parametry dla pełnego układu – finalnego rozwiązania konstrukcyjnego wypełnionego jonitem. W tym celu został przygotowany model stanowiska badawczego z układem igieł z końcówkami umieszczonymi wewnątrz warstwy jonitu dla realizacji pomiaru wartości ciśnienia wewnątrz warstwy wypełnienia jonitowego. Uzyskane w ten sposób wyniki posłużyły do ustalenia parametrów modelu numerycznego. Wyniki badania laboratoryjnego posłużyły również do weryfikacji opracowanego modelu numerycznego, który stanowił rozwiązanie bazowe realizowanego w kolejnym kroku procesu optymalizacji. Proces optymalizacji obejmował poszukiwanie rozwiązania w zakresie zmienności dwóch parametrów. Pierwszy parametr to rozmiar szczeliny w układzie korekty ciśnienia, który jednocześnie stanowił układ ujednorodniania strugi doprowadzanej do komory wymiany jonowej. Drugi parametr to natężenie przepływu strumienia oczyszczanej wody przetłaczanej przez komorę jonowymienną.

Rozdział czwarty zawiera również opis przeprowadzonej optymalizacji w szczególności zostały przedstawione wyniki symulacji numerycznych dla 20 wariantów modelu numerycznego. Poszczególne warianty różniły się rozmiarem szczelin od 1,2 mm do 1,6 mm z przyrostem szczeliny 0,1 mm oraz natężeniami przepływu od 1,1 dm^3/min do 2,6 dm^3/min. Elementem oceny oraz przedmiotem analizy statystycznej była równomierność rozkładu prędkości w przestrzeni wypełnionej jonitem.

Rozdział piąty zawiera analizę przeprowadzonych badań i symulacji wraz z omówieniem przyjętych modeli i metod.

W kolejnym rozdziale Autor zamieścił wnioski, krótko skomentował główne rezultaty pracy oraz wskazał kierunki dalszych działań.

Na końcu pracy zamieszczone zostały rozdziały „Bibliografia", „Spis ilustracji" oraz „Spis tabel".

4. Ocena merytoryczna

Celem postawionym w pracy jest zwiększenie efektywności wykorzystania żywicy wymiany jonowej poprzez opracowanie metody projektowania i optymalizacji komór wymiany jonowej. Funkcją celu, kryterium optymalizacyjnym w recenzowanej pracy jest równomierne obciążenie komory wymiany jonowej. Osiągnięciem Autora jest opracowanie metody pozwalającej na weryfikację równomierności obciążenia komory oczyszczaną strugą. W tym celu Autor opracowuje model numeryczny, przeprowadza jego walidację, określa parametry optymalizacji oraz opracowuje metodę oceny równomierności obciążenia komory. Równomierność obciążenia komory weryfikowana jest poprzez statystyczną ocenę odchylenia standardowego prędkości od jej wartości średniej.

Zaproponowana przez Autora pracy metoda optymalizacji została opracowana dla zbiornika wymiany jonowej przeznaczonego dla zmywarek użytku domowego, będącego przedmiotem patentu zastrzeżonego pod numerami: PCT/CN2020/083801, WO 2021/203313 oraz EP 3962867 A0. W mojej ocenie opracowana przez Autora pracy metoda z powodzeniem może być rozszerzona i stosowana do innych rozwiązań konstrukcyjnych komór jonowymiennych bądź innych zbiorników np. filtrów objętościowych w których równomierne obciążenia objętości złoża ma istotne znaczenie dla realizacji procesu.

Postawiona w pracy teza, zgodnie z którą innowacyjna metoda projektowania zbiornika wymiany jonowej (zaproponowana przez Autora) umożliwia maksymalizację wykorzystania surowca stosowanego w wymiennikach jonowych, znajduje potwierdzenie w przeprowadzonych i przedstawionych w pracy badaniach, symulacjach i analizach. Korzystając z zaawansowanych metod wykorzystujących narzędzia numeryczne oraz narzędzia pozwalające na pracę na dużych zbiorach danych uzyskujemy możliwość do weryfikacji działania, analizy parametrów pracy maszyn oraz procesów w nich realizowanych. Możliwość taką wykazał również Autor

pracy wykorzystując zaawansowane modelowanie numeryczne do odwzorowania pracy komory wymiany jonowej, oraz zastosowanie zaawansowanych narzędzi do oceny statystycznej jej równomiernego obciążenia.

Druga teza w brzmieniu *„Zmiana geometrii zbiornika wymiany jonowej, a w szczególności zmiana geometrii otworu dławienia kanału regulacji ciśnienia prowadzi do zmiany homogenizacji prędkości przepływu wewnątrz zbiornika wymiany jonowej, a tym samym umożliwia maksymalizację wykorzystania surowca wykorzystywanego w wymiennikach jonowych”* została również potwierdzona. Poprzez ukształtowanie i dobór parametrów konstrukcyjnych układu doprowadzenia i odbioru medium przepływającego przez warstwę porowatą Autor uzyskuje równomierne obciążenie w całym przekroju komory, co przekłada się na równomierne obciążenie surowca wykorzystywanego jako czynnik roboczy.

Autor realizując pracę wykazał się umiejętnością rozwiązania złożonego zagadnienia naukowego, które wymagało zaplanowania i przeprowadzenia szeregu działań: stworzone zostały stanowiska badawcze w celu uzyskania parametrów pracy oraz charakterystyk układu, został utworzony model numeryczny badanego układu, przeprowadzone zostało jego strojenie m.in. w oparciu o dane z pomiarów laboratoryjnych, opracowano metodę pozwalająca na ocenę równomierności obciążenia złoża poprzez analizę statystyczną rozkładu wartości prędkości. Realizowane prace wymagały przeprowadzenia szeregu badań i pomiarów laboratoryjnych.

Korzystając z utworzonego modelu symulacyjnego Autor przeprowadził optymalizację działania analizowanej komory wymiany jonowej w celu maksymalizacji wykorzystania wypełnienia jonitowego w zależności od parametrów konstrukcyjnych układu doprowadzania i odprowadzania oczyszczanej wody. Na podstawie uzyskanych wyników Autor wybrał optymalne rozwiązanie konstrukcyjne. Tym samym Autor potwierdził umiejętność zaplanowania eksperymentu, przeprowadzenia

analizy i wyciągania wniosków, jak również prowadzenia badań laboratoryjnych oraz symulacyjnych.

Do osiągnięć Autora należy również zaliczyć opracowanie sposobu wyznaczenia kryterium optymalizacji, którym jest minimalizacja rozproszenia wartości prędkości w komórkach obliczeniowych siatki. Ocena rozproszenia rozkładów prędkości została oparta na przybliżeniach statystycznych sklastrowanych histogramów prędkości pozyskanych z modelu z wykorzystaniem oprogramowania Ansys Fluent.

Treść rozprawy jest zgodna z jej tematem. Kolejne rozdziały tworzą spójny i logiczny układ właściwy dla rozprawy naukowej. Autor osiągnął zamierzony cel, całość pracy stanowi wartościowe opracowanie, posiadające walory utylitarne.

Na pokreślenie zasługuje fakt iż wyniki zrealizowanej pracy mają znaczenie utylitarne, umożliwiają optymalizację aktualnie wdrażanego do produkcji wielkoseryjnej rozwiązania patentowego. Autor wykazał się dobrą znajomością zagadnień z kilku obszarów techniki, wykazał się znajomością technik doświadczalnych oraz zaawansowanych narzędzi modelowania komputerowego, jak również umiejętnością połączenia wiedzy teoretycznej, z praktycznym jej zastosowaniem.

Pracę oceniam pozytywnie; dostrzeżone usterki i uwagi zamieszczone poniżej na ogół mają charakter dyskusyjny.

5. Uwagi krytyczne

Uwagi ogólne o charakterze dyskusyjnym:

- Proces wymiany jonowej jest jednym z procesów wykorzystywanych w układach oczyszczania wody, w szczególności w układach w których niezbędny jest wysoki stopień jej oczyszczenia, np. układ przygotowania wody kotłowej. Tytuł pracy sugeruje opracowanie, które będzie dotyczyło układów z wykorzystaniem żywic wymiany jonowej niezależnie od zastosowania. W pracy brakuje odniesienia do

stosowania opracowanej metody w innych układach niż wybrany przez Autora.

- Zarówno w tytule pracy, jak również w celu pracy otrzymujemy informację o optymalizacji, która stanowi podstawowy element opracowania. Jednocześnie w pracy trudno jest znaleźć informację dotyczącą wyboru metody optymalizacji, jak również uzasadnienia dotyczącego zastosowanej metody. Brak jest również informacji czy w zakresie projektowania komór wymiany jonowej nie prowadzono analiz pod kątem optymalizacji wykorzystania warstwy z jonitem.
- W jakim celu w pracy został zamieszczony opis zjawiska kawitacji, skoro sam Autor stwierdza, że to zjawisko w analizowanym urządzeniu nie występuje.
- Przyjęty przez Autora podział pracy na rozdziały nie ułatwia jej odbioru. Rozdział 4 zatytułowany „Metodyka" zawiera opis wszystkich wykonanych w ramach pracy badań zarówno numerycznych, jak i laboratoryjnych. Rozdzielenie tego rozdziału na dwa podrozdziały osobno opisujący analizy numeryczne i osobno opisujący badania laboratoryjne, w znacznym stopniu ułatwiłoby czytanie i odbiór pracy przez czytelnika.
- W tytule podrozdziału 3.3.6 „Przepływy w ciałach porowatych – przepływy filtracyjne na przykładzie opisów stosowanych w przemyśle naftowym" Autor odnosi się do przykładów w przemyśle naftowym, natomiast w treści takich odniesień nie znajdujemy.
- Skróty CFD (Computational Fluid Dynamics) oraz CAD (Computer Aided Design) w j. angielskim posiadają inne znaczenie niż podane w pracy.

Uwagi szczegółowe:

Praca zawiera znaczną liczbę usterek natury edycyjnej i stylistycznej. Z uwagi na ich liczność, wskazanym byłoby poddać rozprawę profesjonalnej ocenie korektorskiej. Wybrane błędy zamieszczono poniżej:

- W pracy Autor często wykorzystuje zdania wielokrotnie złożone, co utrudnia jednoznaczne odczytanie przekazywanej treści np. „Przykłady komponentów w poszczególnych grupach wraz z analizą własną uśrednionego udziału masowego typów użytego surowca w procesie wytworzenia na bazie danych przedsiębiorstwa zatrudniającego autora zostały przedstawione na rys. 14".
- Do określenia strumienia objętościowego Autor stosuje zamiennie jednostkę [L/min] lub [l/min].
- W podpisie rys. 16 użyto określenia „technologie zgrzewania", właściwym określeniem w tym przypadku będą „techniki zgrzewania".
- Str. 34 - „przyłożonej energii mechanicznej" – energii nie możemy przyłożyć, możemy np. ją dostarczyć.
- Str. 37 - „Zawartość wody wyrażona w niemieckich stopniach twardości waha się istotnie, w funkcji geografii." – geografia jest nauką!
- Str. 38 - „Wpływ geografii na przewidywany poziom twardości wody użytkowej w ramach kontynentu europejskiego został przedstawiony na mapie kolorystycznej na rys. 28." – j.w.
- Na stronie 40 pracy, w specyfikacji wielkości definiujących liczbę Reynoldsa podano:

  „η–*lepkość dynamiczna* $[Pa \cdot s]$"

  oraz

  μ– *dynamiczny współczynik lepkości lub lepkość cieczy* [–]

  jaka jest różnica pomiędzy podanymi wielkościami?
- Str. 42 „Wizualizacja przekroju linii prędkości w przepływie za metodą eksperymentalną Reynoldsa[56] z 1860 roku została przedstawiona na rys. 29".
- Str. 47 – rysunek 32 przedstawia różne metody, a nie modele.
- Str. 55 – „przestrzeń annularna" – w j. polskim to przestrzeń pierścieniowa.
- Str. 62 – „Mesh independence study" – w tłumaczeniu na j. polski to weryfikacja niezależności rozwiązania od siatki.
- Str. 63 - „Przekrój siatkowy modelu CAE Ansys Fluent ..." – jak należy rozumieć przekrój siatkowy. Przekrój może być np. prosty, łamany, stopniowy.
- Str. 66 - „geometria zbiornika jednoznacznie musiała zdefiniować punkty pomiaru ciśnienia w objętości" – w pracy stosowane są różne formy osobowe narracji od bezosobowej przez pierwszą osobę do trzeciej osoby.
- Str. 74, Tab. 1 – opis zestawienie zamieszczonego w tabeli w sposób niejasny informuje odbiorcę, co jest przedstawione na poszczególnych rozkładach, jaka wielkość, w jakiej jednostce, czy jest jakaś skala.
- Str. 74, Rys. 63 – brak opisu osi wykresu.
- Str. 77 – dwukrotnie podany tekst „$_{ps}$–prędkość uśredniona powierzchniowa".
- Str. 77 – jednostkę stojącą przy wartości zapisujemy bez nawiasu kwadratowego np. A=0,005 $[m^2]$.
- Str. 78 – dlaczego skala osi Y na wykresie rys. 66 zaczyna się od wartości „–2000 Pa".

- Str. 78 – w równaniu 9 – zamiast Δp mamy $\nabla p = Si$.
- Str. 81 – „Wizualizacja siatkowania" - poprawnie należało by opisać np. wizualizacja modelu podzielonego siatką.
- Str. 80 – brak opisu osi na wykresach rys. 69, 70.
- Prezentacja okien z wprowadzanymi danymi do aplikacji np. rys. 79, rys. 80, rys. 81 – od strony merytorycznej niewiele wnosi do pracy.
- Str. 100 jak należy rozumieć określenie „wszystkich wartości przepływu"?

6. Wnioski końcowe

Podjęcie tematu badawczego rozprawy doktorskiej uważam za celowe i prawidłowo uzasadnione. Doktorant posiada odpowiednie przygotowanie dla rozwiązywania postawionych problemów naukowych, co wykazał w przedmiotowej rozprawie. Doktorant wykazał się szeroką wiedzą teoretyczną oraz umiejętnością prowadzenia pracy naukowej. Recenzowana rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dotyczącego opracowania metody optymalizacji układów regulacji przepływu filtracyjnego w zbiornikach żywic wymiany jonowej.

Rozprawa doktorska mgr inż. Macieja Kobielskiego wnosi istotny wkład w rozwój wiedzy w dyscyplinie inżynieria mechaniczna zarówno w aspekcie naukowym, jak i utylitarnym.

Stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska mgra inż. Macieja Kobielskiego pt. „Optymalizacja układów regulacji przepływu filtracyjnego w zbiornikach żywic wymiany jonowej" przygotowana pod opieką promotora - dra hab. inż. Wojciecha Skarki, prof. PŚ, spełnia wszystkie warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2024 r., poz. 1571 ze zm.). W związku z powyższym wnoszę o przyjęcie recenzowanej rozprawy doktorskiej przez Radę Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Prof. K. Kołodziejczyk

/podpis odręczny/

*wyłączenie jawności w zakresie danych osobowych oraz ochrony prywatności osoby fizycznej na podstawie art. 5 ust. 2 ustawy z dnia 6 września 2001 r. o dostępie do informacji publicznej (tj. Dz.U. z 2016 r., poz. 1764)