

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  
tel. 0048 12 628 30 26  
e-mail: dtaler@pk.edu.pl

Kraków, 03.03.2022 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Kisielewskiego  
pt. „Dynamika przepływowego wymiennika ciepła służącego do rektyfikacji substancji“**

Recenzowana rozprawa o objętości 105 stron napisana jest w języku polskim. Składa się z 9 rozdziałów oraz spisu literatury cytowanej zawierającej 135 pozycji literaturowych. Na początku rozprawy znajdują się jej streszczenia w języku polskim i angielskim, spis treści oraz spis wybranych oznaczeń.

Przedmiotem rozprawy jest model matematyczny wymiany ciepła w kanałowym (płytkowym) wymienniku ciepła umożliwiający symulację jego pracy w warunkach nieustalonych. Autor w swojej rozprawie określa ten wymiennik skrótem H&MPE od nazwy angielskiej Heat and Mass Plate Exchanger. Tego typu wymiennik może spełniać również funkcję zintegrowanej kolumny destylacyjnej (z angielskiego Heat-Integrated Distillation Column, skrót HIDiC), dzięki czemu możliwe jest zmniejszenie zużycia ciepła do destylacji od 40 do 60% w porównaniu ze zużyciem ciepła w klasycznych kolumnach destylacyjnych.

Kandydat opracował w swojej rozprawie model numeryczny wymiennika ciepła do symulacji jego pracy w warunkach ustalonych i nieustalonych, bazując na równaniach zachowania masy i energii dla objętości skończonych, na które podzielono cały wymiennik. Zapisując równania bilansu masy i energii dla poszczególnych objętości kontrolnych otrzymuje się układ równań różniczkowych zwyczajnych dla strumieni masy i temperatur czynników w węzłach objętości kontrolnych. Stosując metodę transformacji Laplace'a wyznaczone zostały transmitancje operatorowe wiążące ze sobą sygnały wejściowe i wyjściowe analizowanego układu. Modelowanie wymiennika za pomocą opracowanego modelu przeprowadzono przy użyciu programu MATLAB. Opracowany model matematyczny H&MPE może być wykorzystany do badania pracy wymiennika w warunkach nieustalonych a także w układzie automatycznej regulacji wymiennika ciepła.

Tematyka rozprawy jest ważna oraz aktualna i może stanowić przedmiot rozprawy doktorskiej. Recenzowana rozprawa ma duże znaczenie praktyczne.

## **1. Charakterystyka rozprawy**

W rozdziale pt. „Geneza pracy” Autor podkreśla, że około 2/3 energii zużywanej w przemyśle wykorzystywane jest w ciepłych procesach technologicznych.

Przykładem energochłonnego procesu może być konwencjonalna kolumna destylacyjna szeroko stosowana w różnych gałęziach przemysłu. Do odparowania cieczy przed procesem

rektyfikacji stosuje się kocioł destylacyjny (reboiler) o dużej mocy służący do odparowania cieczy.

Rozdział drugi dotyczy analizy dotychczasowego stanu wiedzy na temat wymienników ciepła stosowanych w układach termicznego rozdziału substancji. W kolumnie rektyfikacyjnej ciekły surowiec podgrzany do temperatury nasycenia spływając w dół wrze. Podczas wrzenia odparowuje składnik lżejszy (destylat), a ciecz spływająca w dół wzbogaca się w składnik cięższy (ciecz wyczerpana). Duże zużycie ciepła w reboilerze oraz odprowadzanie ciepła skraplania pary pobieranego przez ciecz chłodzącą skraplacz do atmosfery sprawia, że proces rektyfikacji jest energochłonny. W ciągu ostatnich kilku dekad zaproponowanych zostało kilkanaście sposobów ograniczania energochłonności procesu rektyfikacji, między innymi zastosowanie wymienników płaszczowo-rurowych lub płytowych w układzie do rozdziału substancji. Każdy z wymienionych sposobów zmniejszenia energochłonności procesu rektyfikacji jest krótko omówiony.

W paragrafie 2.3 omówiono modelowanie nieustalonych procesów zachodzących w wymiennikach ciepła, które bazuje na równaniach zachowania masy, pędu i energii.

Stosowane są zwykle trzy różne rodzaje modeli matematycznych wymienników: modele o parametrach skupionych, modele sekcyjne o parametrach skupionych i modele o parametrach rozłożonych. Dynamika przepływowych wymienników ciepła omówiona jest w paragrafie 2.3.1, a dynamika kolumn destylacyjnych w paragrafie 2.3.2. Dynamika aparatów do wymiany ciepła i masy przedstawiona jest w paragrafie 2.3.3, a analiza ilościowa i jakościowa charakterystyk dynamicznych w paragrafie 2.3.4.

Cel i zakres pracy przedstawiony jest w rozdziale 3. Głównym celem rozprawy doktorskiej jest opracowanie i zastosowanie modelu wymiennika H&MPE do analizy dynamiki rozważanego aparatu z uwzględnieniem uwarunkowań przemysłowych, takich jak opór cieplny osadów czy masa cieczy zatrzymanej w aparacie. Teza pracy sformułowana została w paragrafie 3.2. Teza zakłada, że możliwe jest opracowanie uniwersalnego modelu dynamiki wymiennika H&MPE oraz możliwe jest opracowanie wymiennika H&MPE utrzymującego stabilne parametry pracy przy zmiennych warunkach eksploatacyjnych.

Model analityczny wymiennika H&MPE pracującego w warunkach ustalonych omówiony jest w krótkim rozdziale czwartym.

Dynamika wymiennika H&MPE analizowana jest w rozdziale piątym. Założenia przyjęte w sekcyjnym modelu numerycznym wymiennika do symulacji jego pracy w warunkach nieustalonych przedstawione zostały w paragrafie 5.2. Cały wymiennik dzieli się na sekcje, dla których zapisuje się równania bilansu ciepła i masy, przy założeniu że zarówno masa jak i pojemność cieplna sekcji skupione są w jej środku ciężkości. Analiza wpływu ciśnienia na funkcjonowanie aparatu przeprowadzona została w paragrafie 5.3.

Linearyzując człony nieliniowe w różniczkowych równaniach zachowania masy i energii, a następnie stosując do tak przekształconych równań przekształcenie Laplace'a można wyznaczyć transmitancje operatorowe (paragraf 5.4). Pozwalają one wyznaczyć związki między sygnałami wyjściowymi i wejściowymi. Schemat blokowy dla sąsiednich sekcji „i” oraz „j” wymiennika H&MPE jest przedmiotem paragrafu 5.5.

Dynamika wymiennika H&MPE jest analizowana w rozdziale szóstym na przykładzie rozdziału termicznego mieszaniny propan-butan. Dane niezbędne do symulacji numerycznej przedstawione są w paragrafie 6.1 a wybrane wyniki obliczeń w paragrafie 6.2. Parametry

geometryczne wymiennika H&MPE wyznaczone zostały za pomocą opracowanego modelu matematycznego. Bazując na modelowaniu wymiennika w warunkach ustalonych wyznaczona została liczba stopni kontaktu cieczy i oparów, która jest niezbędna do rozdziału mieszaniny propan-butan.

Wykorzystanie modelu matematycznego wymiennika H&MPE do analizy jego pracy w warunkach nieustalonych jest przedmiotem rozdziału siódmego.

W paragrafie 7.1 analizowana była wrażliwość aparatu na stopień wypełnienia cieczą danej sekcji. Przedstawione zostały wyniki symulacji skokowych zmian: ciśnienia w części wzmacniającej aparatu, zmiany strumienia oparów wpływających do części wzmacniającej oraz zmiany strumienia cieczy wpływającej do części odpędowej.

Analiza wrażliwości aparatu na stopień zanieczyszczenia osadami przeprowadzona została w paragrafie 7.2. Sumaryczny opór cieplny osadów po obydwu stronach przegrody zmieniał się w przedziale od  $R_f = 0$  do  $R_f = 0,0009 \text{ m}^2\text{K}$ ). Opór cieplny osadów jest uwzględniany w wyrażeniu na odwrotność współczynnika przenikania ciepła poprzez dodanie go do oporu cieplnego ścianki i konwekcyjnych oporów cieplnych po obydwu stronach ścianki (przegrody).

Krótki opis dalszych prac nad modelem dynamiki wymiennika H&MPE dotyczących głównie układu sterowania dla dwóch kolumn destylacyjnych pracujących równolegle zawiera rozdział 8.

Wnioski sformułowane zostały w rozdziale dziewiątym.

## 2. Uwagi krytyczne

Mgr inż. Piotr Kisielewski podjął się rozwiązania trudnego zagadnienia, zarówno z punktu widzenia modelowania matematycznego jak i praktycznego zastosowania analizowanego w rozprawie wymiennika. Pomimo pozytywnej oceny rozprawy, mam kilka uwag krytycznych:

- Cały wymiennik H&MPE podzielony został na sekcje, dla których zapisane zostały równania bilansu ciepła i masy. Ściankę przegrody między kanałem części wzmacniającej i części odpędowej modelowano jako element o skupionej pojemności cieplnej (równanie (5.5)). Nie uwzględniono pojemności cieplnej osadów na powierzchniach przegrody, tj. obecność osadów uwzględniono tylko we współczynniku przenikania ciepła dla przegrody obliczanym dla stanu ustalonego. Otrzymany w ten sposób układ równań różniczkowych zwyczajnych pierwszego rzędu względem czasu rozwiązano z wykorzystaniem przekształcenia Laplace'a.
- Zastosowanie przekształcenia Laplace'a do rozwiązania układu równań wymagało jego uprzedniej linearyzacji, gdyż przekształcenie Laplace'a można stosować do rozwiązywania liniowych układów równań różniczkowych. Zastosowanie przekształcenia Laplace'a ogranicza zastosowania opracowanego modelu matematycznego do analizy nieustalonego stanu układu w pobliżu wyjściowego stanu ustalonego, kiedy układ równań różniczkowych można traktować jako liniowy.
- Wyników obliczeń otrzymanych za pomocą opracowanego modelu numerycznego nie porównano z wynikami badań eksperymentalnych własnych lub dostępnych w literaturze lub wynikami obliczeń wymiennika H&MPE za pomocą innych modeli matematycznych, nawet modeli uproszczonych.

- W jaki sposób można wyjaśnić zmniejszanie się stałej czasowej (zmniejszanie czasu po którym osiągnany jest stan ustalony) na rysunkach 7.7, 7.8, 7.9 i 7.10 wraz ze wzrostem oporu cieplnego osadów. Czas dochodzenia wymiennika do stanu ustalonego jest najdłuższy dla wymiennika bez osadów. Jeżeli uwzględnić, że zastępczy współczynnik wnikania ciepła z uwzględnieniem warstwy osadu jest mniejszy niż współczynnik wnikania ciepła na powierzchni bez osadu, to stałe czasowe dla każdego z czynników oraz dla przegrody są większe dla wymiennika zanieczyszczonego. Należy się więc spodziewać, że czas po którym wymiennik osiąga stan ustalony po skokowych zmianach wybranych parametrów na wlocie wymiennika będzie dłuższy dla wymiennika zanieczyszczonego.

Wymienione wyżej uwagi krytyczne mogą zostać uwzględnione przez Kandydata w dalszych jego publikacjach.

### **3. Charakterystyka najważniejszych osiągnięć naukowo-badawczych przedstawionych w rozprawie**

Mgr inż. Piotr Kisielewski opracował model numeryczny o parametrach rozłożonych do symulacji nieustalanej pracy wymiennika ciepła służącego do rektyfikacji substancji.

W wymienniku zachodzi wymiana ciepła i masy oraz odkładają się osady na ściankach przegrody oddzielającej czynniki robocze.

Opracowanie modelu wymagało od Kandydata dużej wiedzy oraz dużego nakładu pracy.

Model numeryczny wymiennika przedstawiony w rozprawie może być zastosowany między innymi do wyboru nastaw w regulatorze PID, aby działał on stabilnie przy różnych obciążeniach wymiennika.

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń za pomocą opracowanego modelu Kandydat pokazał, że możliwe jest zastąpienie konwencjonalnego układu do rozdziału substancji złożonego z kolumny rektyfikacyjnej, skraplacza oraz reboilera jednym aparatem (wymiennikiem) do równoczesnej wymiany ciepła i masy.

### **4. Wniosek końcowy**

Rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Kisielewskiego spełnia wszystkie wymagania ustawowe stawiane pracom doktorskim.

Rozprawa wnosi istotny wkład w rozwój modelowania numerycznego nieustalonych zjawisk wymiany ciepła i masy zachodzących w przepływowych wymiennika ciepła służących do rektyfikacji substancji.

Wnioskuje o dopuszczenie mgr inż. Piotra Kisielewskiego do publicznej obrony swojej rozprawy i o nadanie mu stopnia naukowego doktora nauk technicznych.

*Dawid Jaler*